

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический институт

Направление подготовки 130402 «Электроэнергетика и электротехника»

Кафедра Электропривода и электрооборудования

Магистерская диссертация

Тема работы
«Разработка электропривода погружного центробежного насоса»

УДК 62-83:622.53

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Щетинин А.С		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпунов Д.Ю.			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский А.Г.	к.т.н.		

По разделу «Английский язык»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Преподаватель	Баластов Алексей Владимирович			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭПЭО	Дементьев Ю.Н.	Ph.D к.т.н.		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический институт
Направление подготовки (специальность) Электропривод и автоматика
Кафедра Электропривода и электрооборудования

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой
_____ Ю.Н Дементьев
(Подпись) (Дата)
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5Б	Щетинин Александр Сергеевич

Тема работы:

Разработка электропривода погружного центробежного насоса	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	20.02.2017 №1109/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ul style="list-style-type: none">– подача насоса – $30 \text{ м}^3/\text{сут}$;– напор – 2500 м;– диапазон регулирования частоты вращения – не менее $D_\omega = 10$;– на основании расчета выбрать электропривод. <p style="text-align: center;">Параметры питающей сети: 3-х фазная сеть 380/220 В, 50 Гц.</p>
---------------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор установки электроцентробежного насоса; 2. Расчет и выбор погружного двигателя для 6.0 ЭЦН 5 – 30 – 2500 и определение параметров его Т образной схемы замещения; 3. Моделирование в среде MatLab. 4. Экономическая часть 5. Производственная и экологическая безопасность.
Перечень графического материала	Данная работа содержит таблицы и графики
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Расчетная часть	Ляпунов Данил Юрьевич
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кузьмина Наталья Геннадьевна
Социальная ответственность	Дашковский Анатолий Григорьевич
Английская часть	Баластов Алексей Владимирович
Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭПЭО	Ляпунов Д.Ю			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Щетинин Александр Сергеевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5Б	Щетинин Александр Сергеевич

Институт	Энергетический	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<i>1. Стоимость затрат технического проекта (ТП): на специальное оборудование, зарплаты, страховые отчисления, прочие и накладные расходы</i>	<i>Затраты на специальное оборудование определяются согласно стоимости оборудования по прейскурантам или по договорной цене. Заработная плата определяется исходя из тарифной ставки и коэффициентов, зависящих от различных условий: организация, регион. Страховые отчисления определяются согласно Федеральному закону от 24.07.2009 №212-ФЗ Прочие и накладные расходы определяются исходя из суммы остальных статей расходов.</i>
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Планирование и формирование графика работ по реализации ТП</i>	<i>Организация работ ТП</i>
<i>2. Формирование сметы</i>	<i>Смета затрат на проектирование</i>
<i>3. Оценка потенциала и перспективности реализации ТП с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Анализ полученных результатов</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Диаграмма Ганта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Наталья Геннадьевна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Щетинин Александр Сергеевич		

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация объемом 135 страниц, 36 рисунков, 13 таблиц, 22 использованных источников, 9 приложения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, СКАЛЯРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, УСТАНОВКА ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА, АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ, РЕГУЛИРОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ.

Актуальность данной работы заключается в том, что использование погружных центробежных насосов требует постоянного совершенствования насосного оборудования и технологии добычи нефти, поиска новых способов и средств повышения эффективности их применения. Поэтому одним из показателей эффективности применения этих насосов является надежность, которая определяется межремонтным периодом оборудования.

структура работы: в работе произведен расчет и выбор уэцн который обеспечит откачку заданного дебита скважины. произведен расчет параметров и выбор погружного электродвигателя. Достигнутые технико-эксплуатационные показатели: полностью соответствующие заданию.

Выполнен расчет стоимости ресурсов научного исследования, норм и нормативов расходования ресурсов, ставки налогов, отчислений, а так же произведено описание рабочего места и использованных законодательных и нормативных документов по данной теме

Магистерская диссертация выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010, также использовались программы MathCad 14, MATLAB 12

Работа представлена на CD - диске (в конверте на обороте обложки).

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. СОСТАВ И КОМПЛЕКТНОСТЬ УЭЦН.....	10
1.1. Краткая характеристика объекта и применяемого оборудования	10
1.2. Погружной центробежный насос	10
1.3. Погружной электродвигатель.....	11
1.4. Гидрозащита электродвигателя (протектор и компенсатор).....	13
1.5. Газосепаратор	17
1.6. Кабельные линии установок ЭЦН.....	20
2. ВЫБОР НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ ПО ВЕЛИЧИНЕ ПЛАНИРУЕМОГО ДЕБИТА И НАПОРА ..	28
2.1 Методика подбора ПЭД и гидрозащиты	29
2.2 Методика подбора кабельной линии	31
2.3 Определение параметров Т образной схемы замещения погружного электродвигателя ПЭДН – 40 – 117.....	33
2.4. Проверка адекватности расчетных параметров двигателя.....	39
2.5. Расчет естественных характеристик электродвигателя	40
2.5.1 Расчет естественной механической характеристики.....	40
2.5.2 Расчет естественной электромеханической характеристики.....	42
2.5.3 Механическая характеристика насоса	44
3. ОБЗОР СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	46
3.1 Системы управления электроприводом.....	46
3.2 Выбор закона частотного регулирования	48
3.3. Методика подбора наземного оборудования.....	48
3.3.1. Подбор ТМПП.....	48
3.3.2. Подбор станции управления.....	50
4. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ ПРИ ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ	53
4.1 Механические характеристики системы преобразователь-двигатель при законе регулирования	
5. ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД СО СКАЛЯРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ	57
5.1 Функциональная схема системы скалярного частотного управления	62
5.2 Имитационные исследования частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса со скалярным управлением	68
5.3. Имитационное исследование длинной линии.....	70
5.4 Анализ неисправностей ЭЦН.....	73
6. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	76
6.1 Организация работ технического проекта.....	76
6.2 Смета затрат на проектирование.....	79
6.2.1 Материальные затраты.....	80

6.2.2 Затраты на амортизацию	80
6.2.3 Затраты на заработную плату	81
6.2.4 Затраты на социальные нужды	82
6.2.5 Прочие затраты	82
6.2.6 Накладные затраты	82
6.3. Определение экономической эффективности проекта.....	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	85
Список использованных источников:	86
Приложение 1. Каталог ступеней и насосов ЗАО «Новомет – Пермь».....	88
Приложение 2. Технические характеристики электродвигателей ПЭДТН.....	90
Приложение 3 Технические характеристики трансформаторов серии ТМПН.....	93
Приложение 4. Потери напряжения на 1000м кабельной линии	95
Приложение 5. Подбор СУ с частотным регулированием в зависимости от номинальной мощности ПЭД	98

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в нефтяной промышленности для добычи сырья применяются погружные электроцентробежные насосы (ЭЦН). С помощью ЭЦН производится огромное количество механизированной добычи нефти в Российской Федерации.

Использование насосов требует постоянного усовершенствования компонентов которые входят в состав насосного оборудования и технологии добычи нефти. Поэтому всегда требуется поиск новых средств повышения эффективности их применения.

Одним из главных показателей эффективности насосного оборудования является надежность. Она определяется межремонтным периодом оборудования. Процедура подземного ремонта включает остановку скважины, которая влечет за собой огромные финансовые потери у добывающей нефтяной компании. Одно из направлений повышения эффективности работы ЭЦН является изменение скорости вращения вала насоса, с помощью частотно-управляемого электропривода. Также в последние годы не менее важной стала проблемы борьбы с «длинными линиями». Электроэнергия передаваемая от поверхности скважины до ЭЦН в большинстве случаев не соответствует заданным параметрам, тем самым приводит к неправильной работе насосного оборудования.

Целью магистерской диссертации является разработка электропривода погружного центробежного насоса для откачки пластовой жидкости на поверхность скважины.

1. СОСТАВ И КОМПЛЕКТНОСТЬ УЭЦН

1.1. Краткая характеристика объекта и применяемого оборудования

В данной диссертации будет рассматриваться скважина принадлежащая нефтедобывающей компании. Погружная часть оборудования определяется параметрами скважины.

Около скважины размещается эстакада по которой соединяются между собой погружной кабель и питающий кабель системы управления.

К наземному оборудованию относятся:

1.Трансформаторы, питающие погружные насосы;

2.Станция управления установкой;

3.Соединительные кабели, между станцией управления и трансформаторами, а так же питающие кабели.

1.2. Погружной центробежный насос

Отличие данного ЭЦН от других центробежных насосов в том, что он многосекционный с малым диаметром ступеней – рабочих колес и направляющих аппаратов рисунок 1[1].

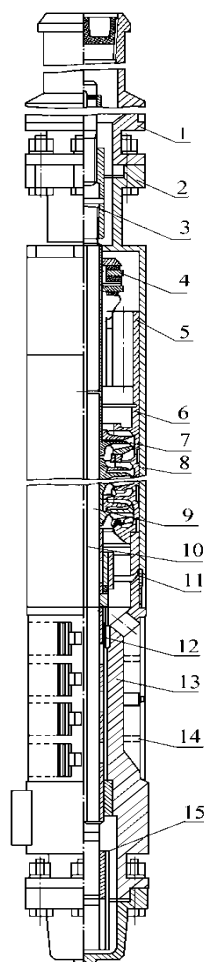


Рисунок 1- Центробежный многоступенчатый насос ЭЦН

1- верхняя секция с ловильной головкой; 2- нижняя секция; 3- шлицевая муфта; 4- опорная пята; 5- корпус подшипника; 6- направляющий аппарат; 7- рабочее колесо; 8- корпус; 9- вал; 10- шпонка; 11- подшипник скольжения; 12- защитная втулка; 13- основание; 14- приемная сетка; 15- приводная муфта

1.3. Погружной электродвигатель

Погружной электродвигатель (ПЭД) состоит из двух главных частей : электродвигателя и гидрозащиты. В состав электродвигателя входит статор, ротор и головки и переводника. Корпус статора представляет собой стальную трубы, на конце которой предусмотрена резьба для подсоединения головки и основания двигателя. Электродвигатель

заполняется специальным маловязким, высокой диэлектрической прочности маслом с пробивным напряжением не менее 30 кВ, служащим как для охлаждения, так и для смазки деталей ПЭД.

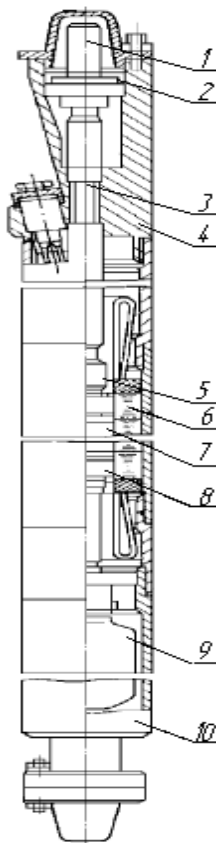


Рисунок 2- Электродвигатель серии ПЭД

1 - муфта; 2 - радиально-опорный узел; 3 - верхняя головка со штепсельной колодкой; 4 - вал; 5 – циркуляционная турбина; 6 - статор; 7 – ротор; 8 – подшипник скольжения; 9 - масляный фильтр; 10 – основание с обратным клапаном

В электродвигателе Активная часть магнитопровода совместно с обмоткой вращающееся магнитное поле, а немагнитная часть служит для опоры для подшипников ротора. К концам обмотки статора присоединяют выводные концы, изготовленные из многожильного медного провода с изоляцией, обладающих высокой электрической и механической

прочностью. Выводные концы обмотки соединяют с кабелем через специальную штепсельную колодку (муфту) кабельного ввода.

Ротор двигателя короткозамкнутый, многосекционный состоит из нескольких отдельных пакетов, каждый из которых имеет самостоятельную обмотку, выполненную в виде беличьей клетки. В пазы сердечников закладываются медные стержни, соединяемые по концам короткозамыкающими кольцами. Подача масла в двигатель осуществляется через переводник, находящийся в нижней части. Также в его состав входит масляный фильтр. Двигатель применяется для работы в среде с температурой до 110 С содержащей:

- мехпримесей не более 0.5 г/л;
- свободного газа не более 50%;
- сероводорода для нормальных, не более 0.01 г/л, коррозионностойких до 1,25 г/л;

В состав гидрозащиты ПЭД входит протектор и компенсатор. Гидрозащита служит для того чтобы предохранять внутренние полости электродвигателя от попадания пластовой жидкости, а также чтобы компенсировать температурные изменений объемов масла и его расхода. Протектор двухкамерный, с резиновой диафрагмой и торцевыми уплотнениями вала, компенсатор с резиновой диафрагмой.[1]

1.4. Гидрозащита электродвигателя (протектор и компенсатор)

Гидрозащита предназначена для комплектации погружных маслonaполненных электродвигателей диаметра корпуса 103, 117 и 130 мм, используемых в качестве привода центробежных насосов для откачки пластовой жидкости из нефтяных скважин, и служит для предохранения внутренней полости двигателя от попадания пластовой жидкости, а также компенсации температурных изменений объема масла. Пластовая жидкость,

попадая в электродвигатель, снижает изоляционные свойства масла, а проникая через изоляцию обмоточных проводов, может привести к короткому замыканию обмотки. Кроме того, ухудшается смазка подшипников вала двигателя.

Гидрозащиты изготавливаются:

- обычного и коррозионностойкого исполнения;
- по теплостойкости – обычного исполнения для работы в среде с температурой до 90 °С, теплостойкого исполнения для работы в среде с температурой до 120 °С;
- с головкой верхней обычной или совмещенной с приемным устройством насоса с шести или восьми шпилечным соединением на торце верхней головки;
- с узлом усиленного подпятника, выдерживающего осевую нагрузку до 700 кг, или обычным подпятником;
- с полиэтиленовой пробкой и обычным клапаном в перепускном канале компенсатора.

В настоящее время на промыслах Российской Федерации широко распространены гидрозащиты типа Г, П и ПД.

Гидрозащита типа Г состоит из двух основных сборочных единиц: *протектора*, который устанавливается между насосом и двигателем и *компенсатора*, расположенного в нижней части двигателя.

Протектор служит для гидравлической защиты электродвигателя от пластовой жидкости и смазки радиально-упорного подшипника (при необходимости) – рисцнок 3. Основной объем протектора, формируемый эластичным мешком 5, заполнен жидким маслом. Через обратный клапан 7

наружная поверхность мешка воспринимает давление продукции скважины на глубине спуска подземного агрегата.

Верхний конец вала 1 соединяется шлицевой муфтой с нижним концом вала насоса. Торцовое уплотнение 2 разделяет верхнюю полость, в которой может быть скважинная жидкость, от полости ниже уплотнения, которая заполнена трансформаторным маслом, находящимся, как и скважинная жидкость, под давлением, равным давлению на глубине погружения.

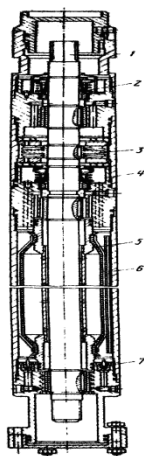


Рисунок 3 – Конструкция протектора гидрозащиты типа Г: 1 – вал; 2, 4 – торцовые уплотнения; 3 – упорный узел (опорная пята); 5 – мешок (диафрагма); 6 – корпус; 7 – обратный клапан.

Ниже торцового уплотнения 2 располагается подшипник скользящего трения, а еще ниже – узел 3 – опорная пята, воспринимающая осевое усилие вала насоса (также работает в жидком масле). Ниже расположено второе торцовое уплотнение 4 для более надежной герметизации двигателя. Под ним располагается резиновый мешок 5 в корпусе 6, он герметично разделяет 2 полости: внутреннюю полость мешка, заполненную трансформаторным маслом, и полость между корпусом 6 и самим мешком, в который имеет доступ скважинная жидкость через обратный клапан 7. Она, проникая в полость, сжимает мешок с маслом до давления, равного внешнему. Жидкое

масло по зазорам вдоль вала проникает к торцовым уплотнениям и вниз к ПЭД. Разработана конструкция гидрозащиты ГД, в которой на валу есть небольшая турбина, создающее повышенное давление во внутренней полости мешка 5.

При этом внешняя полость между корпусом 6 и мешком 5 заполняется густым маслом, питающим шариковый радиально-упорный подшипник ПЦЭН.

Компенсатор (рисунок 4) расположен в нижней части двигателя и предназначен для выравнивания давления в двигателе ($p_{\text{двиг}} = p_{\text{пласт. жид-ти}}$), а также для компенсации объема масла внутри двигателя при изменении температурного режима электродвигателя (нагревание и охлаждение) и представляет собой эластичный мешок, заполненный жидким маслом и расположенный в корпусе.

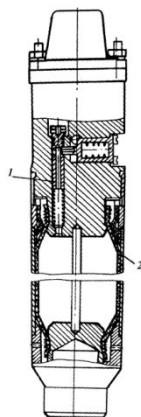


Рисунок 4 – Конструкция компенсатора гидрозащиты типа Г: 1 – поршень автоматического клапана; 2 – диафрагма (мешок).

Корпус компенсатора имеет отверстия, сообщающие наружную поверхность мешка со скважиной. Внутренняя полость мешка связана с электродвигателем, а внешняя – со скважиной.

При охлаждении масла объем мешка уменьшается, и скважинная жидкость через отверстия в корпусе компенсатора входит в зазор между наружной поверхностью мешка и внутренней стенкой корпуса компенсатора, создавая тем самым условия полного заполнения внутренней полости погружного электродвигателя маслом. При нагревании масла в электродвигателе объем его увеличивается, и масло перетекает во внутреннюю полость мешка компенсатора; при этом скважинная жидкость из зазора между наружной поверхностью мешка и внутренней поверхностью корпуса выдавливается через отверстия в скважину.

В шифрах гидрозащиты, например, 1Г51 приняты следующие условные обозначения: 1 – модификация; Г – тип гидрозащиты; 5 – условный размер ОК; 1 – номер разработки.

К основным составным частям протектора типа П относятся: вал, торцовые уплотнения, корпус, камеры, связанные между собой гидравлически с помощью отверстий, выполненных во фланцах в месте установки торцовых уплотнений. Внутренние полости диафрагм заполнены маслом.

Торцовые уплотнения с двумя диафрагмами, закрепленными на цилиндрах, образуют верхнюю камеру над торцовым уплотнением, в районе верхней диафрагмы – среднюю камеру, в районе нижней диафрагмы – нижнюю камеру.

1.5. Газосепаратор

Постоянная интенсификация добычи нефти и широкий диапазон изменения газового фактора добываемой нефти приводят к тому, что превышаются допустимые значения свободного газосодержания на входе в насос. Это приводит к ухудшению условий работы насоса и Погружного

электродвигателя, увеличению вибрации установки и снижению ее работоспособности.

Для борьбы с газом в скважинах, эксплуатируемых УЭЦН, применяются различные конструкции газосепараторов и диспергирующих устройств.

Применение газосепараторов или диспергаторов позволяет предотвратить кавитацию, запирание рабочих органов насоса, обеспечить необходимую производительность насоса, повысить коэффициент полезного действия.

Применение сепараторов предусматривает установку на приеме насоса специальных устройств, разделяющих жидкость и газ, и выброс последнего в затрубное пространство.

Использование диспергаторов позволяет увеличить допускаемое значение объемного газосодержания на приеме от 0,10 до 0,25 за счет образования тонкодисперсной структуры откачиваемой среды. Диспергаторы эффективны в обводненных скважинах, образующих вязкую эмульсию, так как способствуют разрушению ее структуры.

Диспергатор является сильным турбулизатором потока и способствует эффективному выравниванию структуры газожидкостной смеси. Диспергаторы могут устанавливаться как вне, так и внутри насоса взамен нескольких рабочих ступеней.

Мировыми производителями выпускается три типа газосепараторов: гравитационные, вихревые, центробежные.

Применение центробежных газосепараторов является самым надежным средством защиты ЭЦН от вредного влияния свободного газа. От эффективности их работы во многом зависят параметры эксплуатации и наработка на отказ погружного насоса в скважине.

Для отделения газа от жидкости в этих газосепараторах используется плавучесть газовых пузырьков под действием гравитационных или центробежных сил.

Гравитационный газосепаратор имеет наименьший коэффициент сепарации, центробежный - наибольший, а вихревой газосепаратор по коэффициенту сепарации занимает промежуточное положение.

Конструкция и принцип действия центробежного газосепаратора.

Центробежные газосепараторы представляют собой отдельные насосные модули, монтируемые перед пакетом ступеней нижней секции насоса посредством фланцевых соединений. Валы секций или модулей соединяются шлицевыми муфтами.

Принцип действия данного газосепаратора заключается в том, что ротор, вращаясь с валом насоса, создает интенсивное вращательное движение смеси в сепараторе, благодаря чему происходит разделение смеси на жидкость и газ. Газ под действием возникающего при вращении смеси градиента давления выжимается из вращающегося кольца смеси в сторону наименьшего давления (к центру), а жидкость под действием центробежных сил отбрасывается к периферии внутренней камеры газосепаратора.

Газосепаратор (рисунок 5) состоит из трубного корпуса 1 с головкой 2, основания 3 с приемной сеткой и вала 4 с расположенными на нем рабочими органами. В головке выполнены две группы перекрестных каналов 5, 6 для газа и жидкости и установлена втулка радиального подшипника 7. В основании размещены закрытая сеткой полость с каналами для приема газожидкостной смеси (ГЖС) 8, подпятник 9 и втулка 10 радиального подшипника. На валу размещены пята 11, шнек¹ 12, осевое рабочее колесо 13 с суперкавитирующим профилем лопастей, сепараторы 14 и втулки радиальных подшипников 15. В корпусе размещены направляющая решетка и гильзы.

Газосепаратор работает следующим образом: ГЖС попадает через сетку и отверстия входного модуля на шнек и далее к рабочим органам газосепаратора. За счет приобретенного напора ГЖС поступает во вращающуюся камеру сепаратора, снабженную радиальными ребрами, где под действием центробежных сил газ отделяется от жидкости. Далее жидкость с периферии камеры сепаратора поступает по каналам переводника на прием насоса, а газ через наклонные отверстия отводится в затрубное пространство.

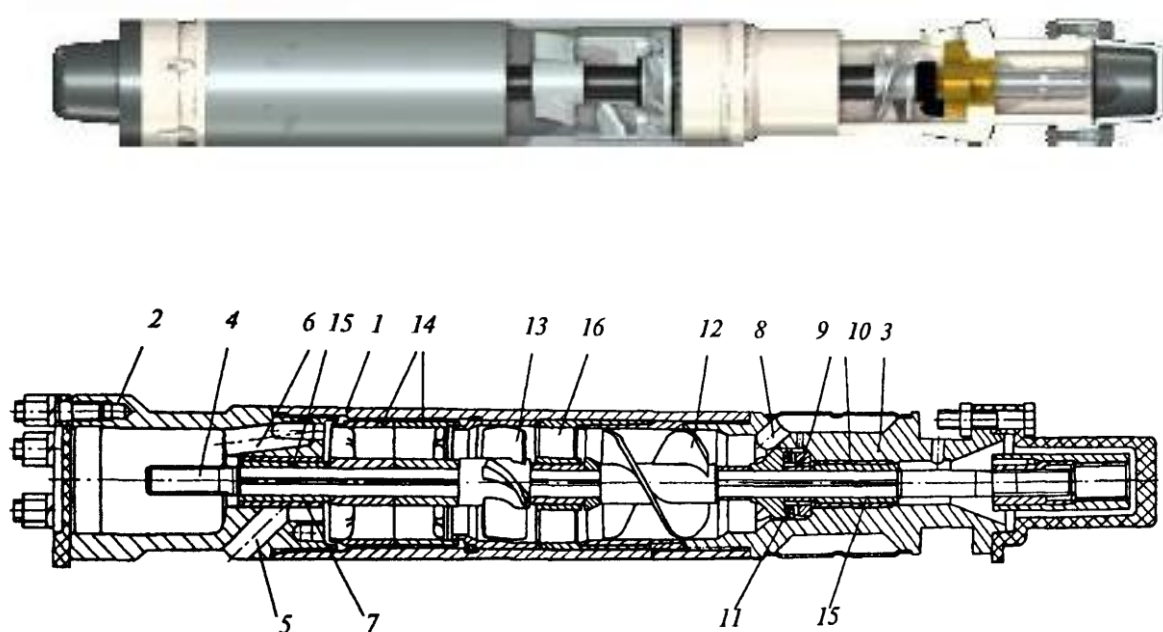


Рисунок 5 – Газосепаратор: 1 – трубный корпус; 2 – головка; 3 – основание; 4 – вал; 5, 6 – перекрестные каналы; 7, 10, 15 – втулки радиальных подшипников; 8 – полость с каналами; 9 – подпятник; 11 – пята; 12 – шнек; 13 – рабочее колесо; 14 – сепараторы.

1.6. Кабельные линии установок ЭЦН

Кабельные линии предназначены для подачи электрической энергии к погружным электродвигателям установок добычи нефти и перекачки жидкости.

К кабельным линиям предъявляются достаточно жесткие требования – малые электрические потери, малые диаметральные габариты, хорошие диэлектрические свойства изоляции, термостойкость к действию низких и высоких температур, хорошая сопротивляемость воздействию пластовой жидкости и газа и пр.

Кабельная линия состоит из основного питающего кабеля (круглого или плоского), который расположен вдоль колонны НКТ от станции управления до погружного агрегата, соединенного с ним кабеля-удлинителя с муфтой кабельного ввода.



Рисунок 6 – Кабельная муфта

Соединение основного кабеля с кабелем-удлинителем обеспечивается неразъемной соединительной муфтой (кабельным сростком). С помощью сростка могут быть соединены также участки основного кабеля для получения требуемой длины.

Кабельная линия на основной линии чаще всего имеет круглое сечение (круглый кабель). Для уменьшения диаметра погружного агрегата (кабель+центробежный насос) нижняя часть кабеля имеет плоское сечение.

Кабель выпускается с полимерной изоляцией, которая накладывается на жилы кабеля в два слоя. Три изолированные жилы кабеля соединяются вместе, накрываются предохраняющей подложкой под броню и затем металлической броней. Металлическая лента брони предохраняет изоляцию жил от механических повреждений при хранении и работе, в первую очередь – при спуске и подъеме оборудования.

У погружного двигателя кабельная линия заканчивается штепсельной муфтой, которая обеспечивает герметичное соединение с обмоткой статора двигателя.

Верхний конец кабельной линии проходит через специальное устройство в оборудовании устья скважины, которым обеспечивается герметичность затрубного пространства, и соединяется через клеммную коробку с электрической линией станции управления. Как уже указывалось ранее, клеммная коробка предназначена для предупреждения попадания нефтяного газа из полости кабельной линии в трансформаторные подстанции и шкафы станций управления.

Кабельная линия в состоянии транспортирования и хранения располагается на специальном барабане, используемом также при спусках и подъемах установок на скважинах, профилактических и ремонтных работах с кабельной линией.

Технические условия на кабельные линии типа К43 предусматривают 120 типоразмеров кабельных линий длиной от 515 до 2450 м и сечением основных кабелей от 10 до 50 мм².

Условные обозначения:

КПБК, КПБП – кабель с полиэтиленовой изоляцией, бронированный, круглый; кабель с полиэтиленовой изоляцией, бронированный, плоский. Они предназначены для работы при температуре окружающей среды до 90°C. Используются в качестве основных кабелей.

КППБК, КППБП – кабель с полипропиленовой изоляцией, бронированный, круглый и плоский соответственно. При температуре окружающей среды до 95°C.

Для скважин с температурой среды более 95°C в качестве основных должны использоваться кабели марок КПБПТ, КППБПТ – кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, теплостойкие (при температурах до 110°C и 120°C), а также кабели марок КПБТ, КПБПТ и КЭБПТ.

В качестве кабеля-удлинителя предусмотрен кабель марки КФСБ с изоляцией из полиамидно-фторопластовой пленки и фторсополимера, предназначенный для работы при температуре до 160°C. Иногда взамен кабеля КФСБ допускается использование кабелей КПБПТ, КППБПТ, КПБП или КППБП.

Примеры условного обозначения:

КП-16-1600-У2-25/10 – основной кабель – плоский с сечением жил 16 мм², длиной 1600м с удлинителем из кабеля КППБПТ («2» - условное обозначение марки кабеля-удлинителя) длиной 25 м, с сечением жил 10 мм².

Кабель КФСБ 3Х6 2500 – кабель марки КФСБ с медными жилами, изоляцией из полиимидно-фторпластовой пленки и фторсополимера, со свинцовыми оболочками поверх изоляции жил, бронированного, плоского, теплостойкого, сечением жил 6 мм², на рабочее напряжение 2500 В.

Конструкции кабелей КПКБ (круглого), КППБ и КПОБП (плоских) показаны на рис. 1.13 а, в, з, где:

- 1 - медная однопроволочная жила;
- 2 - первый слой изоляции из полиэтилена высокой плотности;
- 3 - второй слой изоляции из полиэтилена высокой плотности;
- 4 - полушка из прорезиненной ткани или равноценных заменяющих материалов;
- 5 - броня из стальной оцинкованной ленты S-образного профиля (для кабеля КПКБ) или ступенчатого профиля (для кабелей КППБ и КПОБП).

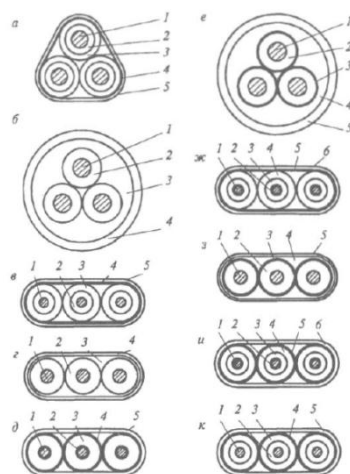


Рисунок 7 – Конструкции кабелей для установок погружных электронасосов

Конструктивные исполнения кабелей КППБК и КППБП аналогичны конструктивным исполнениям кабелей КПКБ и КППБ.

Медные однопроволочные жилы кабелей КППБК и КППБП покрыты оловянно-свинцовым припоем или полиэтилентерефталатной пленкой.

Первый слой изоляции жил выполнен из полипропилена, второй - из полипропилена или полиэтилена высокой плотности.

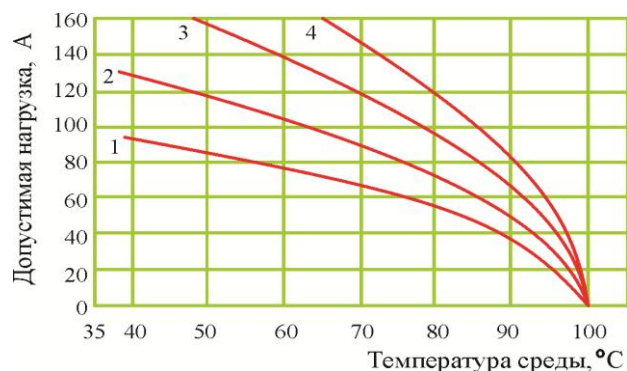


Рисунок 8 – Зависимость допустимых токовых нагрузок кабеля КПКБ и КППП от температуры скважинной среды (цифрами обозначены сечения (мм²): 1 – 10; 2 – 16; 3 – 25; 4 – 35)

Муфта кабельного ввода устанавливается на конце кабеля-удлинителя, присоединяемом к ПЭДу. Она имеет металлический корпус 2, припаянный к броне кабеля-удлинителя 7, изолированные жилы которого герметично заделаны в корпусе с помощью резинового уплотнителя 4, зажатого между шайбами 3 и 5 гайкой 6. На концах токопроводящих жил кабеля закреплены с помощью резьбовых соединений штепсельные наконечники 7, при этом резьбовые поверхности токопроводящих жил покрыты припоем для обеспечения надежности электрического контакта. Резьбовые соединения позволяют восстанавливать присоединительные размеры муфт при усадках изоляции жил кабеля и осевых смещениях самих жил без переделки муфты. При потере герметичности муфта может быть восстановлена поджатием уплотнителя 4 через шайбу 5 гайкой 6.

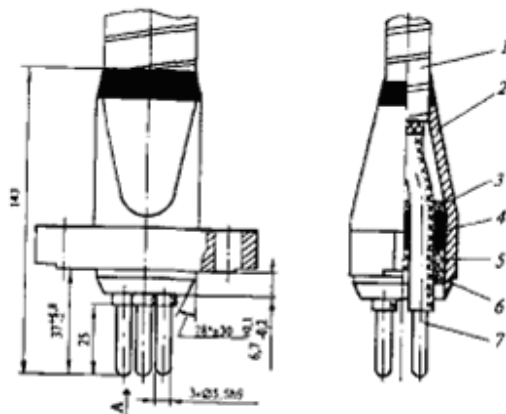


Рисунок 9 – Муфта кабельного ввода: 1 – кабель-удлиннитель; 2 – корпус; 3 – шайба; 4 – уплотнитель; 5 – шайба; 6 – гайка; 7 – наконечник штепсельный

Кабельный сrostок.

Соединение токопроводящих жил сращиваемых кабелей может осуществляться пайкой оловянно-свинцовым припоем с использованием медных гильз, а также пайкой с применением медно-фосфорных припоев.

Места соединений токопроводящих жил заполняются самослипающейся лентой типа ЛЭТСАР, накладываемой до диаметра, равного диаметру изолированных жил кабелей. Поверх заполнений накладываются еще два слоя ленты ЛЭТСАР, перекрывающие заполнения на 20 мм в каждую сторону. Изолирование мест соединений жил осуществляется липкой нефтестойкой фторопластовой пленкой Ф-4ЭО-ЛН, накладываемой поверх ленты ЛЭТСАР в 4 слоя с перекрытием каждого предыдущего слоя изоляции на 10 мм в каждую сторону. Кроме того, поверх уложенных вместе сращенных изолированных жил кабелей накладывается подушка из двух слоев стеклоленты и броня из стальной оцинкованной ленты S-образного профиля. Концы бронеленты припаиваются к броне сращиваемых кабелей.

Приспособления для крепления и защиты кабеля.

Для сохранения целостности кабеля и его изоляции при спускоподъемных операциях необходимо кабель фиксировать на колонне

ЦКТ. При этом необходимо применять фиксирующие приспособления вблизи участка изменения диаметра колонны, т.е. около муфты или высадки под резьбу. При фиксации кабеля необходимо следить за тем, чтобы кабель плотно прилегал к трубам, а в случае применения плоского кабеля необходимо следить за тем, чтобы кабель не был перекручен.

Простейшими приспособлениями для крепления кабелей к насосно-компрессорным трубам (НКТ) и узлам погружного насосного агрегата УЭЦН являются металлические пояса с пряжками или клямсы (от англ. Clamp – зажим, скоба).

Крепление кабеля-удлинителя к узлам погружного агрегата (погружного насоса, протектора и двигателя) осуществляется в местах, указанных в руководствах по эксплуатации данного вида оборудования; крепление кабеля удлинителя и основного кабеля к НКТ осуществляется по обе стороны каждой муфты НКТ на расстоянии 200-250 мм от верхнего и нижнего торцов муфты.

Эксплуатация установок УЭЦН в наклонных и криволинейных скважинах потребовала создания приспособлений для крепления кабелей и защиты их от механических повреждений.

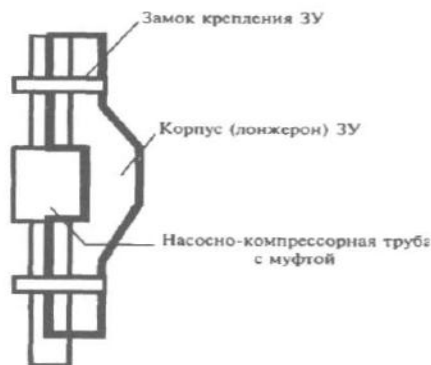


Рисунок 10– Конструктивная схема защитного устройства

Данные устройства устанавливаются на муфте НКТ и обладают следующими техническими особенностями:

- обеспечивают простую и надежную фиксацию (осевую и радиальную) на НКТ;
- надежно удерживают и защищают кабель, в т.ч. в аварийных ситуациях;
- не имеют сборно-разборных элементов (винтов, гаек, шплинтов и др.), что исключает их попадание в скважину при монтаже и спускоподъемных операциях;
- предполагает многократное использование;
- монтаж устройства не требует слесарно-монтажного инструмента.

2. ВЫБОР НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ ПО ВЕЛИЧИНЕ ПЛАНИРУЕМОГО ДЕБИТА И НАПОРА

Выбор насосной установки производится с учетом необходимого дебита, напора, габарита, по каталожным данным приведенным в Приложении 1

В соответствии с техническими требованиями, выбираем установку 6.0 ЭЦН 5 – 30 - 2550 ее параметры занесем в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры выбранной установки 60ЭЦН5-30-2550

QoB м ³ /сут	30
Количество секций	3
Длина секций м	5+6+6
Количество ступеней	537
Напор м	2550

Из таблицы видно, что выбранная установка полностью соответствует техническим требованиям

2.1 Методика подбора ПЭД и гидрозащиты

В общем случае по максимальной потребляемой мощности насоса, диаметру эксплуатационной колонны, температуре пластовой жидкости подбирается двигатель необходимого исполнения, мощности и габарита [2].

В случае если предполагается работа установки при 60Гц, то двигатель подбирается с учетом роста потребляемой мощности насоса. Потребляемая мощность насоса при увеличении частоты растет в кубической зависимости, а мощность двигателя - в линейной.

Например: при 50Гц насос потребляет 19,7 кВт, если предполагается работа только при 50Гц подбирается двигатель 28 кВт.

При предположении работы насоса при 60Гц будут следующие результаты: если при 50Гц насос потребляет 55 кВт то при 60Гц:

При подборе двигателя так же учитывается потребляемая мощность гидрозащиты и газосепаратора, принимаем потребляемую мощность гидрозащиты и газосепаратора при частоте 50Гц, $P_{г1} = 3\text{кВт}$

Находим потребляемую мощность насоса при 60Гц:

$$P_{\text{нас2}} = \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^3 P_{\text{нас1}} = \left(\frac{60}{50}\right)^3 19.7 = 34.04 \text{ кВт} \quad (2.1)$$

Далее находим потребляемую мощность гидрозащиты и газосепаратора:

$$P_{\text{г2}} = \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^3 P_{\text{г1}} = \left(\frac{60}{50}\right)^3 3 = 5,184 \text{ кВт} \quad (2.2)$$

Потребляемая мощность установки:

$$P_{\text{нас2}} = P_{\text{г2}} + P_{\text{нас2}} = 5,184 + 34.04 = 39,224 \text{ кВт} \quad (2.3)$$

Из каталожных данных ,приведенных в Приложении 2, выбираем погружной двигатель ПЭДН – 40 - 117

Занесем его параметры в Таблицу 2:

Таблица 2. – Параметры выбранного погружного электродвигателя ПЭДН – 40 - 117

Тип электродвигателя	ПЭДН 40 - 117
Номинальная мощность, кВт	40
Номинальное напряжение, В	1250
Номинальный ток, А	26
КПД, %	84,4
Cos φ, о.е.	0,842
Скольжение, %	3,9
Миним. диаметр скважин, мм	123,7
Скорость охлаж. жидкости не менее, м/с	0,07
Кол-во секций	1

Установочная длина, мм	4485
Масса, кг	305
Синхронная частота вращения, об/мин	3000
Мах. темп. охл. жид- кости, °С	120
Мах. темп. обмотки двигателя, °С	170

В случае, когда известны все характеристики пласта, скважины, свойства жидкости глушения, согласована комплектация УЭЦН (наличие/отсутствие обратного клапана, станции управления с частотно-регулируемым приводом), выяснена потребляемая мощность насоса для данных условий, возможен более корректный подбор ПЭДа.

На примере ВНН5-30 рассмотрим, при каких подаче и напоре насос будет потреблять максимальную мощность:

2.2 Методика подбора кабельной линии

При выборе кабеля следует определить:

- 1) площадь сечения жилы кабеля;
- 2) тип кабеля;
- 3) длину кабеля.

Выбор площади сечения жилы и типа кабеля обуславливается совместным влиянием факторов: допустимых токовых нагрузок и температуры скважинной среды, параметров флюида и пространственных ограничений в кольце между НКТ и обсадной трубой.

Длина кабельной линии подбирается исходя из глубины спуска ПЭД в скважину с учетом расстояния от устья до ТМПН (газоотделительной коробки).

Длина удлинителя подбирается таким образом, чтобы сросток удлинителя с основным кабелем находился минимум на 2-3 м выше ловильной головки насоса, а также по допустимым токовым нагрузкам и температуре скважинной среды.

Удлинитель или термостойкая вставка подбирается по температуре скважинной жидкости, проходящей по НКТ и допустимым токовым нагрузкам (рис. 11, рис. 12).

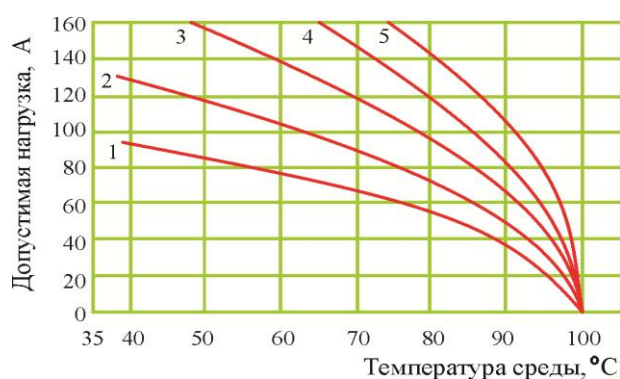


Рисунок 11 – Зависимость допустимых токовых нагрузок кабеля КРБП от температуры скважинной среды (смеси жидкости и газа).

Цифрами обозначены сечения кабеля, мм²: 1 - 10, 2 - 16, 3 - 25, 4 - 35, 5 - 50

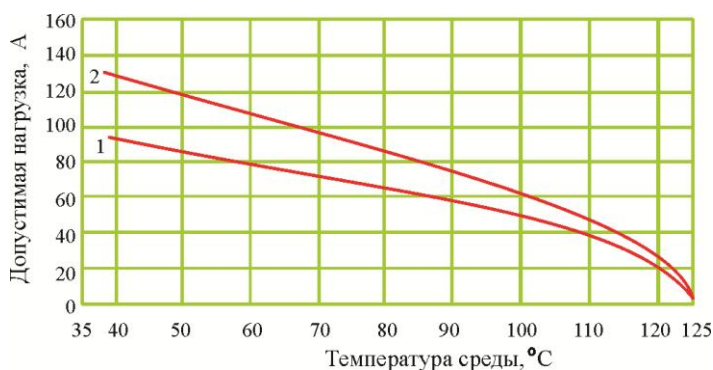


Рисунок 12 – Зависимость допустимых токовых нагрузок кабеля КРБПТ от температуры скважинной среды (смеси жидкости и газа).

Цифрами обозначены сечения кабеля, мм²: 1 - 10, 2 – 16

2.3 Определение параметров Т образной схемы замещения погружного электродвигателя ПЭДН – 40 – 117

Технические данные погружного электродвигателя ПЭДН – 40 – 117 необходимые для определения параметров Т образной схемы замещения, приведены в Таблице 3.

Таблица 3 – Технические данные электродвигателя ПЭДН – 40 – 117:

Напряжение двигателя фазное, В $U_{1фн}$	735
Синхронная частота вращения, об/мин n_0	3000
Мощность двигателя, кВт Р _{двн}	40
Скольжение при номинальной нагрузке, % s_n	3,9
КПД при номинальной нагрузке, % η_n	85,0
$\cos\varphi$ при номинальной нагрузке $\cos\varphi_n$	0,83
Кратность максимального момента m_k	1,9
Кратность пускового момента $m_{п}$	1,0
Кратность минимального момента m_m	0,9
Кратность пускового тока $k_{дв}$	7,0
Число пар полюсов Z_p	1

Момент инерции двигателя, кг · м ²	2,63
---	------

Наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения, представленная на рисунке 13.[3], [4]

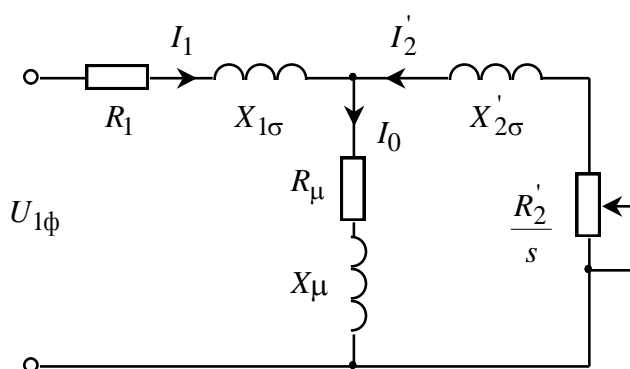


Рисунок 13 – Схема замещения асинхронного двигателя

На рисунке схемы замещения имеются следующие параметры:

- $U_{1\phi}$ – фазное напряжение подводимое к обмотке статора двигателя;
- I_1 – ток обмотки статора;
- R_1 – активное сопротивление обмотки статора;
- $X_{1\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;
- I_2' – приведенный ток обмотки ротора к обмотке статора;
- R_2'/s – приведенное активное сопротивление цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;
- $X'_{2\sigma}$ – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;
- I_0 – ток холостого хода (намагничивания);
- X_m – индуктивное сопротивление контура намагничивания.

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие данной схеме:

$$\bar{U}_{1\Phi} - \bar{E}_m - j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 = 0 \quad (2.4)$$

$$\bar{E}_m + j \cdot X_2' \cdot \bar{I}_2' + R_2' \cdot \bar{I}_2' / s = 0 \quad (2.5)$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2' - \bar{I}_0 = 0 \quad (2.6)$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений изображена на рисунке 14.

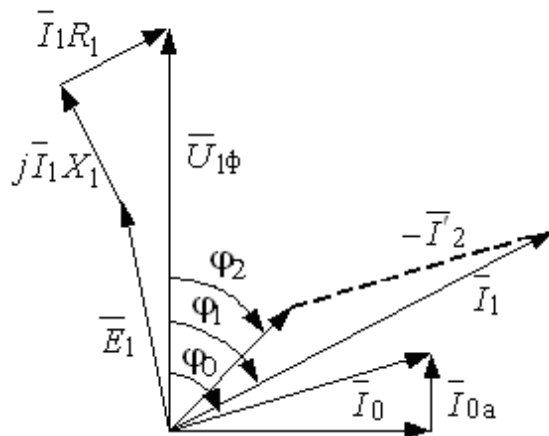


Рисунок 14 – Векторная диаграмма асинхронной машины

Определим дополнительные параметры асинхронного двигателя по каталожным данным.

Синхронная угловая частота вращения двигателя, рад/с

$$\omega_0 = \frac{\pi \times n_0}{30} = \frac{3,14 \times 3000}{30} \omega_0 = 314,159 \quad (2.7)$$

Номинальная частота вращения двигателя, об/мин

$$n_n = (1 - s_n) \times n_0 = \left(1 - \frac{3,9}{100}\right) \times 3000 \quad n_n = 2883 \quad (2.8)$$

Номинальная частота вращения двигателя, рад/с

$$\omega_n = (1 - s_n) \times \omega_0 = \left(1 - \frac{3,9}{100}\right) \times 314,159 \quad \omega_n = 301,907 \quad (2.9)$$

Номинальный ток двигателя, А

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \times U_{1H} \times \cos \varphi \times \eta_H} = \frac{P_{двн} \times 1000}{3 \times U_{1фн} \times \cos \varphi_H \times \frac{\eta_H}{100}} I_{1H} = 25,713 \quad (2.10)$$

Номинальный момент двигателя, Н · м

$$M_H = M_{двн} = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{P_{двн} \times 1000}{\omega_H} M_H = 132,491 \quad (2.11)$$

Коэффициент загрузки двигателя, принимаем $p_z = 0,75$

КПД двигателя при частичной загрузке, принимаем $\eta_z = 0,85 + \Delta\eta_z$

Коэффициент мощности при частичной загрузке, принимаем

$$\cos \varphi_z = 0,83 + \Delta \cos \varphi_z = 0,759 \quad (2.12)$$

Ток статора двигателя при частичной загрузке, А

$$I_{11} = \frac{p_z \times P_H}{3 \times U_{1H} \times \cos \varphi_z \times \eta_z} = \frac{p_z \times P_{двн} \times 1000}{3 \times U_{1фн} \times \cos \varphi_z \times \eta_z} I_{11} = 20,134 \quad (2.13)$$

Определяем предварительное значение тока холостого хода асинхронного двигателя по выражению

Ток холостого хода двигателя, А

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left[\frac{p_z \times I_{1H} \times \left(1 - \frac{S_H}{100}\right)}{1 - p_z \times \frac{S_H}{100}} \right]^2}{1 - \left[\frac{p_z \times \left(1 - \frac{S_H}{100}\right)}{1 - p_z \times \frac{S_H}{100}} \right]^2}} I_0 = 9,547 \quad (2.14)$$

β – коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статор и ротора, значение которого находится в диапазоне 0,6-2,5.

Для двигателей с малым номинальным значением скольжения следует выбирать $\beta \geq 1$, а для двигателей с повышенным скольжением $\beta \leq 1$

Принимаем $\beta = 2,5$.

$$\text{Расчетный коэффициент } c_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \times k_{\text{дв}} \times I_{1\text{н}}} c_1 = 1,027 \quad (2.15)$$

Критическое скольжение

$$S_k = \frac{S_{\text{н}}}{100} \times \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 \times \left[1 - 2 \times \frac{S_{\text{н}}}{100} \times \beta \times (m_k - 1) \right]}}{1 - 2 \times \frac{S_{\text{н}}}{100} \times \beta \times (m_k - 1)} S_k = 0,171 \quad (2.16)$$

Приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора в номинальном режиме, Ом

$$R_{2\text{пр}} = \frac{3 \times U_{1\text{фн}}^2 \times \left(1 - \frac{S_{\text{н}}}{100} \right)}{2 \times m_{\text{к}} \times P_{\text{двн}} \times 1000 \times c_1^2 \times \left(\beta + \frac{1}{S_k} \right)} R_{2\text{пр}} = 1.167 \quad (2.17)$$

Активное сопротивление обмотки статора, Ом

$$R_1 = c_1 \times R_{2\text{пр}} \times \beta \quad R_1 = 2,995 \quad (2.18)$$

Коэффициент, характеризующий соотношение индуктивного сопротивления короткого замыкания и приведенного активного сопротивления ротора

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{S_k} \right)^2 - \beta^2} \quad \gamma = 5,269 \quad (2.19)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания в номинальном режиме, Ом

$$X_{\text{кн}} = \gamma \times c_1 \times R_{2\text{пр}} X_{\text{кн}} = 6,312 \quad (2.20)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в номинальном режиме, Ом

$$X_{1\sigma} = 0,42 \times X_{\text{кн}} X_{1\sigma} = 2,651 \quad (2.21)$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния в номинальном режиме, Гн

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \times \pi \times f_{1H}} L_{1\sigma} = 8,439 \times 10^{-3} \quad (2.22)$$

Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора в номинальном режиме, Ом

$$X_{2\sigma\text{пр}} = 0,58 \times \frac{X_{\text{кн}}}{c_1} X_{2\sigma\text{пр}} = 3,566 \quad (2.23)$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме, Гн

$$L_{2\sigma\text{пр}} = \frac{X_{2\sigma\text{пр}}}{2 \times \pi \times f_{1H}} L_{2\sigma\text{пр}} = 0,011 \quad (2.24)$$

ЭДС цепи намагничивания, наведенная потоком воздушного зазора (главным полем), в номинальном режиме, В

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\text{фн}} \times \cos \varphi_{\text{н}} - I_{1\text{н}} \times R_1)^2 + (U_{1\text{фн}} \times \sin \varphi_{\text{н}} - I_{1\text{н}} \times X_{1\sigma})^2} \quad (2.25)$$

$$E_1 = 633,203$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания, Ом

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} X_{\mu} = 66,325 \quad (2.26)$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре, Гн

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \times \pi \times f_{1H}} L_{\mu} = 0,211 \quad (2.27)$$

Полученные расчётные параметры Т-образной схемы замещения электродвигателя сведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры схемы замещения электродвигателя ПЭДН – 40 -117

R_1 , Ом	$X_{1\delta}$, Ом	$L_{1\delta}$, Гн	X_{μ} , Ом	L_{μ} , Гн	R_2' , Ом	X_{2d}' , Ом	$L_{2\delta}'$, Гн	X_{KH} , Ом
2,995	2,651	8,439х 10 ⁻³	66,325	0,211	1,167	3,566	0,011	6,312

2.4. Проверка адекватности расчетных параметров двигателя

При найденных параметрах рассчитываются значения номинального электромагнитного момента двигателя

$$M_{\text{ЭМН1}} = \frac{3 \times U_{1\Phi H}^2 \times R_{2\text{пр}}}{\omega_0 \times \frac{S_H}{100} \times \left[X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R_{2\text{пр}}}{\frac{S_H}{100}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \times R_{2\text{пр}}}{\frac{S_H}{100} \times X_{\mu}} \right)^2 \right]} \quad (2.28)$$

$$M_{\text{ЭМН}} = M_{\text{ЭМН1}}$$

$$\Psi_{2HZ} = \sqrt{2} \times I_0 \times L_{\mu} \quad \Psi_{2HZ} = 2.85 \quad (2.29)$$

$$M_{\text{ЭМН2}} = \frac{3}{2} \times Z_p \times \frac{L_{\mu}}{L_{\mu} + L_{2\sigma\text{пр}}} \times \Psi_{2HZ} \times \sqrt{2} \times \sqrt{I_{1H}^2 - I_0^2} \quad (2.30)$$

Проверяемые условия

$$M_{\text{ДВН}} < M_{\text{ЭМН1}} \leq 1.1 \times M_{\text{ДВН}}; \quad M_{\text{ЭМН1}} \approx M_{\text{ЭМН2}} \quad (2.31)$$

$$M_{\text{ДВН}} = 132.492 \quad M_{\text{ЭМН1}} = 137.171 \quad 1.1M_{\text{ДВН}} = 145.174 \quad M_{\text{ЭМН2}} = 136.998$$

$$\Delta_M = (M_{\text{ЭМН1}} - M_{\text{ЭМН2}}) \Delta_M = 0.174 \quad (2.32)$$

По результатам расчета эти условия выполняются, что говорит об адекватности расчетных параметров двигателя.

2.5. Расчет естественных характеристик электродвигателя

Расчет естественных характеристик проводится с целью оценки степени совпадения параметров основных характерных точек расчетных естественных характеристик электродвигателя с параметрами двигателя определенными по справочным техническим данным выбранного электродвигателя [3].

2.5.1 Расчет естественной механической характеристики

Естественная механическая характеристика $\omega(M)$ асинхронного электродвигателя рассчитывается для частоты $f_{\text{и}}=f_{1\text{н}}=50$ Гц по выражению

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[(X_{\text{кн}})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}. \quad (2.33)$$

Задаемся скольжением в пределах $s = 0.01, 0.02, \dots, 0.5$ и рассчитываем по программе *Mathcad* естественную механическую характеристику $\omega(M)$ (рисунок 15),

$$\text{где } \omega = \omega_0 \cdot (1 - s). \quad (2.34)$$

Также рассчитываем номинальное значение электромагнитного момента двигателя $M_{\text{эм.н}}$

$$M_{\text{эм.н}}(s_{\text{н}}) = M_{\text{эм.н}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \cdot \left[(X_{\text{кн}})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{\text{н}} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 735^2 \cdot 1,167}{314,16 \cdot 0,039 \cdot \left[6,312^2 + \left(2,995 + \frac{1,167}{0,039} \right)^2 + \left(\frac{2,995 \cdot 1,167}{0,039 \cdot 66,325} \right)^2 \right]} = 137,171 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

критического скольжения

$$s_{\text{к}} = R_2' \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_1}{X_{\mu}} \right)^2}{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = 1,167 \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{2,995}{66,325} \right)^2}{2,995^2 + 6,312^2}} = 0,167 \quad (2.35)$$

и электромагнитного критического момента

$$M_{\text{эм.н}}(s_{\text{к}}) = M_{\text{эм.к}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2}{\omega_0 \cdot 2 \cdot \left[R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{кн}}^2) \cdot \left(1 + \frac{R_1}{X_{\mu}} \right)^2} \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 735^2}{314,16 \cdot 2 \cdot \left[2,995 + \sqrt{(2,995^2 + 6,312^2) \cdot \left(1 + \frac{2,995}{66,325} \right)^2} \right]} = 250,498 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

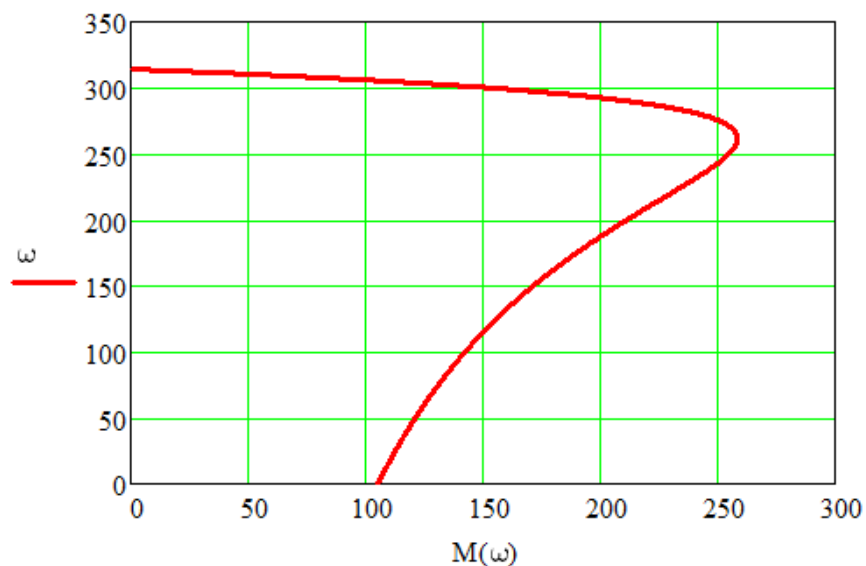


Рисунок 15 – Естественная механическая характеристика

асинхронного электродвигателя

$$n_H = 2883 \frac{\text{об}}{\text{мин}} \omega_H = \frac{\pi \times n_H}{30} \omega_H = 301,907 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.36)$$

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} M_H = 132.491 \quad (2.37)$$

$$M(\omega) = 137.171$$

2.5.2 Расчет естественной электромеханической характеристики

Естественная электромеханическая характеристика $I_1(\omega)$ электродвигателя рассчитывается для значения частоты $f_H = f_{1H} = 50$ Гц по выражению

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(\omega) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(\omega) \cdot 0,673}, \quad (2.38)$$

где

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\pm \sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{\omega_0 - \omega})^2 + (X_{1H} + X_{2H}')^2}}; \quad (2.39)$$

- значение приведенного тока ротора от скольжения;

По результатам расчета строим естественные электромеханические характеристики токастатора $I_1 = f(\omega)$ приведенные на рисунке 16.

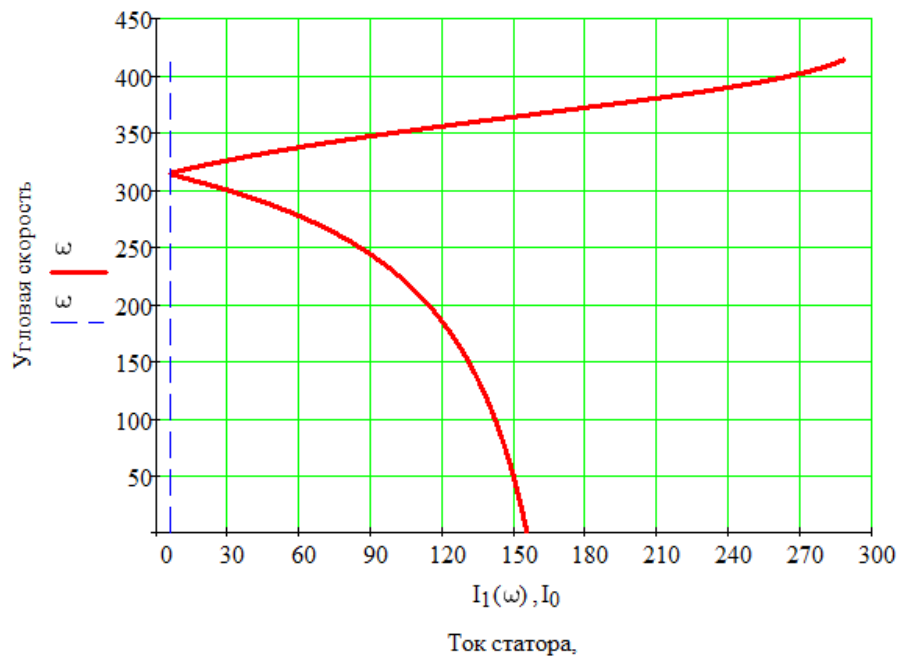


Рисунок 16 – Естественные электромеханические характеристики асинхронного электродвигателя

Оценка достоверности расчетных характеристик двигателя

В результате расчета естественных характеристик двигателя получены следующие параметры для их характерных точек:

$$s_H = 3,78\%; \quad s_K = 25,1\%; \quad I_{1H} = 25,713 \text{ A}; \quad I_{1\text{макс}} = 116,48 \text{ A};$$

$$\frac{I_{1\text{макс}}}{I_{1H}} = 4,53; \quad (2.40)$$

$$M_{\text{эм.н}} = 137,171 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_{\text{эм.макс}} = 294,9 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{эм.макс}} / M_{\text{эм.н}} = 2,15; \quad (2.41)$$

$$M_{\text{эм.пуск}} = 274,3 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_{\text{эм.пуск}} / M_{\text{эм.н}} = 2.$$

Справочные и расчетные параметры двигателя:

$$s_{\text{н}} = 3,9\%; \quad s_{\text{к}} = 25\%; \quad I_{\text{дв.н}} = 26 \text{ А}; \quad I_{\text{дв.макс}} / I_{\text{дв.н}} = 7;$$

$$M_{\text{дв.н}} = 134 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_{\text{дв.макс}} / M_{\text{дв.н}} = 2,2; \quad M_{\text{дв.пуск}} / M_{\text{дв.н}} = 2.$$

Из сравнения параметров расчетных характеристик со справочными параметрами двигателя следует, что совпадение расчетных и справочных параметров обеспечивается только на рабочих участках расчетных характеристик (при изменении скольжения от $s=0$ до $s=s_{\text{к}}$). Это дает возможность использовать упрощенную методику расчета характеристик частотно-регулируемого асинхронного электропривода в режимах плавного изменения частоты, когда работа двигателя всё время происходит на рабочих участках механических характеристик.

2.5.3 Механическая характеристика насоса

Поскольку механическая характеристика двигателя рассчитаны для электромагнитного момента, то полная нагрузка на валу электродвигателя должна учитывать собственный момент трения двигателя. Момент от сил трения на валу электродвигателя можно принять постоянным и равным

$$\Delta M_{\text{с дв}} = M_{\text{эм н}} - M_{\text{дв н}} = 137,171 - 134 = 3,171 \text{ Нм}. \quad (2.42)$$

Для механизма с вентиляторным типом нагрузки, что характерно для насоса, статический момент сопротивления на валу двигателя $M_c(\omega)$ изменяется в зависимости от скорости вращения двигателя в соответствии с выражением [6]

$$M_c(\omega) = \Delta M_{с\text{ дв}} + (M_{с\text{ макс}} - \Delta M_{с\text{ дв}}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{дв.н}} \right)^2 =$$

$$= 3,171 + (137,171 - 3,171) \cdot \left(\frac{\omega}{301,907} \right)^2, \quad (2.43)$$

где $M_{с\text{ макс}} = M_{эм\text{ н}} = 137,171 \text{ Нм}$ - момент нагрузки при скорости вращения $\omega_{дв.н} = 301,907 \text{ рад/с}$, равный номинальному электромагнитному моменту двигателя.

Механические характеристик полного момента сопротивления на валу двигателя, соответствующих механическим характеристикам насоса, приведены на рисунке 17.

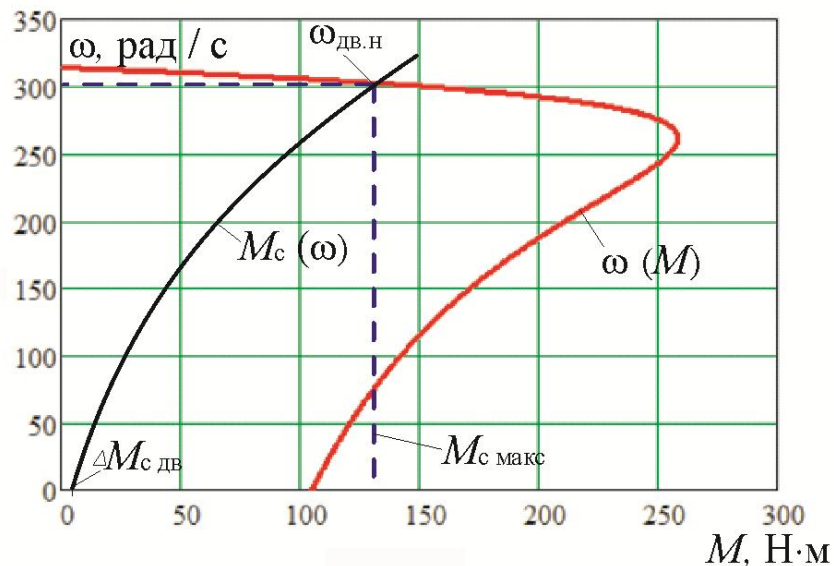


Рисунок 17 - Естественная механическая характеристика двигателя $\omega(M)$ и характеристики полного момента сопротивления на валу двигателя $M_c(\omega)$

Из анализа приведённых на рисунке 17 характеристик следует, что электродвигатель ПЭДН – 40 - 117 обеспечивает требуемое значение максимальной скорости насоса 60 ЭЦН 5 – 30 -2550 $\omega_{\text{дв.н}} = 301,907$ рад/с, длительную работу при максимальном моменте нагрузки и более чем двукратную перегрузку по моменту.

Принимаем эквивалентный момент инерции электропривода. [5]

$$J_{\text{э}} = 1,2 \cdot J_{\text{дв}} = 1,2 \cdot 0,0021 = 0,0025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

3. ОБЗОР СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 Системы управления электроприводом

Многие ведущие электротехнические корпорации мира сегодня выпускают регулируемые автоматизированные электроприводы (АЭП) комплектно с микропроцессорными средствами автоматизации в виде гибко программируемых систем, предназначенных для широкого использования. Поэтому актуальность проектирования АЭП насосного агрегата, выполненного в общепромышленном исполнении заключается в решении задачи выбора системы управления электроприводом (СУЭП) для максимального повышения эффективности работы и производительности технологического оборудования.[6]

Исходя из требований к СУЭП, при проектировании предлагаются к рассмотрению две схемы управления: схема векторного регулирования и схема скалярного управления электроприводом насосной установки,

выполненными по системе преобразователь частоты - короткозамкнутый асинхронный электродвигатель (ПЧ-АД).[5]

Выбор способа и принципа управления производится на основании требований к регулированию скорости и показателям качества регулирования: диапазону регулирования, плавности, точности поддержания заданной скорости. Обязательно учитываются динамические показатели качества процесса регулирования: быстродействие, перерегулирование и др. Кроме того, при выборе системы управления электроприводом обязательен учет характера нагрузки, создаваемой рабочим механизмом. Частотное управление электродвигателями осуществляется двумя основными способами.

Скалярный принцип частотного управления является наиболее распространенным в электроприводе. Ему свойственна техническая простота измерения и регулирования абсолютных значений переменных АД. Управление осуществляется по функциональной характеристике, связывающей напряжение и частоту статора электродвигателя (U/f - характеристике), с применением модуля IR-компенсации для поддержания постоянства потокоцепления статора в соответствии с этой характеристикой. В статических режимах позволяет добиться за счет обратных связей желаемых свойств электропривода. Применяется для электроприводов, в которых отсутствуют высокие требования к динамике.[7]

Векторный принцип управления базируется на принудительной взаимной ориентации векторов потокоцеплений и токов АД в полярной или декартовой системах координат в соответствии с заданным законом регулирования. За счет регулирования модулей переменных и углов между их векторами обеспечивается управление АД как в статике, так и в динамике, обеспечивая тем самым заметное улучшение качества переходных процессов. Именно этот факт является определяющим при выборе системы с векторным управлением и находит применение в электроприводах со средней и высокой

динамикой. Приводы таких механизмов как насосы занимают промежуточное положение между высокодинамичными, динамичными и низкодинамичными.

Поскольку скалярное управление позволило получить искусственные механические характеристики с требуемой жесткостью и учитывая, преимущества этого вида управления, можно сделать вывод, что данный способ управления может быть применён при проектировании СУЭП по системе ПЧ-АД насосной установки. [8]

3.2 Выбор закона частотного регулирования

С учетом того, что диапазон регулирования скорости насосов невелик и механизмы такого класса не требуют обеспечения высокой кратности пускового и максимального моментов, в качестве законов регулирования U_1/f_1 могут быть приняты законы $U_1/f_1 = \text{const}$ и $U_1/f_1^2 = \text{const}$ [9].

Последний является более сложным в реализации, но за счет дополнительного снижения напряжения позволяет уменьшить потребляемую из сети энергию. Для повышения пускового момента на малых скоростях до требуемых значений должна быть предусмотрена возможность настройки вольт-частотной характеристики. Определяя параметры вольт-частотной характеристики, нижним частотам ставят в соответствие значения напряжений выше, чем при выбранном законе регулирования.

3.3. Методика подбора наземного оборудования

3.3.1. Подбор ТМПН

По номинальной мощности выбранного двигателя вычисляется необходимая мощность трансформатора серии ТМПН.

Минимально допустимая мощность ТМПН рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{ТПН}} = N_{\text{НОМ}} \times 1,6 = 64 \text{ кВа}, \quad (3.1)$$

где $P_{\text{ТПН}}$ - мощность трансформатора, кВа

$N_{\text{НОМ}}$ - номинальная мощность двигателя, кВт

1,6 - постоянный коэффициент пересчета

Выбираем ТМПН из таблицы (Приложение 3) ТМПН – 100/3 – УХЛ 1.

Выбирается нужная ступень напряжения на трансформаторе (необходимая отпайка ТМПН должна находиться в середине диапазона переключений, для того чтобы была возможность поднять напряжение при возникновении нестандартных ситуаций, например: «заклинивание»), для чего ориентировочно определяется необходимое напряжение на выходе трансформатора с учётом потерь напряжения в кабельной линии по формуле:

$$U_{\text{отп.ТПН}} = \frac{F}{50} \times U_{\text{НОМ}} + \Delta U, \quad (3.2)$$

где:

$U_{\text{НОМ}}$ - номинальное напряжение ПЭД (из паспорта ПЭД), В.

ΔU - потери напряжения в кабеле, которые зависят от длины кабеля, температуры пластовой жидкости номинального тока ПЭД.

F - предполагаемая рабочая частота питающего напряжения Гц.

Значения потерь напряжения на 1000метров кабельной линии приведены в Приложении 4.

При определении потерь напряжения (ΔU) необходимо соответствующее значение из таблицы привести к общей длине кабеля:

$$\Delta U = \frac{\text{значение из табл.} \times L_{\text{каб.общ}}}{1000} = \frac{57 \times 2600}{1000} = 148,2 \text{ В}, \quad (3.3)$$

где:

$L_{\text{каб. общ}}$ – общая длина кабеля

Тогда напряжение ступени при 60Гц:

$$U_{\text{отп.тмпн}} = \frac{60}{50} \times 1250 + 148,2 = 1648,2 \text{ В}$$

Т.к. на ТМПН 100/3 – УХЛ 1 самая высокая ступень регулировки $U_{\text{отп.тмпн100}} = 1690 \text{ В}$, при возникновении нестандартных ситуаций, не будет возможности регулировки в большую сторону, поэтому отказываемся от выбора ТМПН 100/3 – УХЛ 1 и выбираем ТМПН 125/3 – УХЛ 1, далее выбираем ближайшую, подходящую ступень регулировки из таблицы (Приложение 3):

$$U_{\text{отп.тмпн125}} = 1660 \text{ В.}$$

3.3.2. Подбор станции управления

Через номинальный ток двигателя и коэффициент трансформации ТМПН вычисляется максимальный ток на первичной обмотке трансформатора. По максимальному току на первичной обмотке подбирается станция управления. В зависимости от потребляемой мощности ПЭД подбирается СУ, предполагается работа установки отличной от 50 Гц поэтому подбирается станция управления с частотным преобразователем (Приложение 5).

Для ПЭДН – 40 из Приложения 5 выбираем СУ с частотным регулированием «Электон-05» 400

Описание станции управления серии «ЭЛЕКТОН-05-400»

Станция управления «Электон-05-400» предназначена для регулирования частоты вращения, оптимизации работы и защиты серийно выпускаемых электродвигателей.

Область применения — погружные асинхронные или вентильные электродвигатели для добычи нефти, асинхронные электродвигатели общепромышленного исполнения, применяемые для водозаборов и водоснабжения, приводов винтовых насосов, для дымососов и промвентиляции.

Основные характеристики станции управления «Электон-05» 400 приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Основные ха характеристики СУ «Электон-05» 400

Номинальный ток первичной силовой цепи, А	400
Номинальная мощность преобразователя (при 380 В), кВА	250
Номинальное напряжение питания, В	380 (50±1Гц)
Диапазон отклонения питающего напряжения от ном. значения, %	-50...+25
Температурный диапазон, °С	-60...+40
Диапазон изменения частоты, Гц	3,5...70±1%
Габаритные размеры, мм	1890x925x758
Масса, кг	380

Описание станции управления серии «ЭЛЕКТОН-05-400»

Станция управления «Электон-05-400» предназначена для регулирования частоты вращения, оптимизации работы и защиты серийно выпускаемых электродвигателей.

Область применения — погружные асинхронные или вентильные электродвигатели для добычи нефти, асинхронные электродвигатели общепромышленного исполнения, применяемые для водозаборов и водоснабжения, приводов винтовых насосов, для дымососов и промвентиляции.

Электрическая принципиальная схема СУ ЭЛЕКТОН-05-400 приведена в приложении 9.



Рисунок 18 – Станции управления ПЭД производства ЗАО «Электон»

4. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ ПРИ ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

Вольт-частотная характеристика преобразователя при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$, рассчитанная по выражению [10]

$$U_1(f_1) = U_{1\text{фн}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2, \quad (4.1)$$

приведена на рисунке 19.

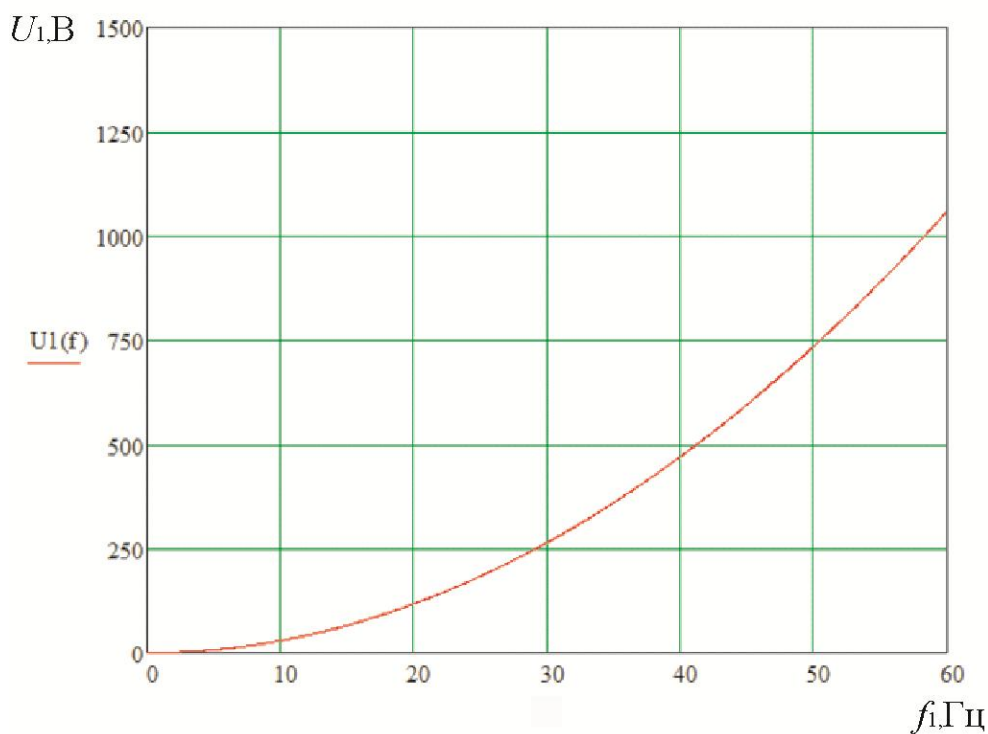


Рисунок 19 - Вольт-частотная характеристика преобразователя: 1 - при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$.

Максимальную частоту инвертора, соответствующую номинальному режиму работы насоса определяем из условия обеспечения номинальной рабочей скорости двигателя $\omega_{\text{дв.н}} = 301,907 \text{ рад/с}$. Принимаем максимальное

значение частоты инвертора $f_{\text{и макс}} = f_{1\text{н}} = 50$ Гц. Для обеспечения пусковой характеристики двигателя исходя из требуемого диапазона регулирования скорости, принимаем минимальную частоту инвертора $f_{\text{и мин}} = 10$ Гц.

4.1 Механические характеристики системы преобразователь-двигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$

Механические характеристики $\omega(M)$ разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ для ряда выбранных значений выходной частоты инвертора: $f_{1\text{н1}}=50$ Гц; $f_{1\text{н2}}=30$ Гц ; $f_{1\text{н3}}=15$ Гц; $f_{1\text{н4}}=10$ Гц рассчитываются с помощью программы *Mathcad* по выражениям:

$$M(s, f_1) = \frac{3 \cdot U_1^2(f_1) \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \cdot s \cdot \left[\left(X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot U_1^2(f_1) \cdot 2,49}{314,16 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot s \cdot \left[\left(9,12 \cdot \frac{f_1}{50} \right)^2 + \left(3,96 + \frac{2,49}{s} \right)^2 + \left(\frac{3,96 \cdot 2,49}{s \cdot 121 \cdot \frac{f_1}{50}} \right)^2 \right]} \quad (4.2)$$

Где:

$$U_1(f_1) = U_{1\text{фн}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2 = 220 \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^2 ;$$

$$\omega(s, f_1) = 314,16 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot (1 - s).$$

По результатам расчета на рисунке 20 построено семейство механических характеристик $\omega(M)$ системы преобразователь – двигатель при изменении частоты.

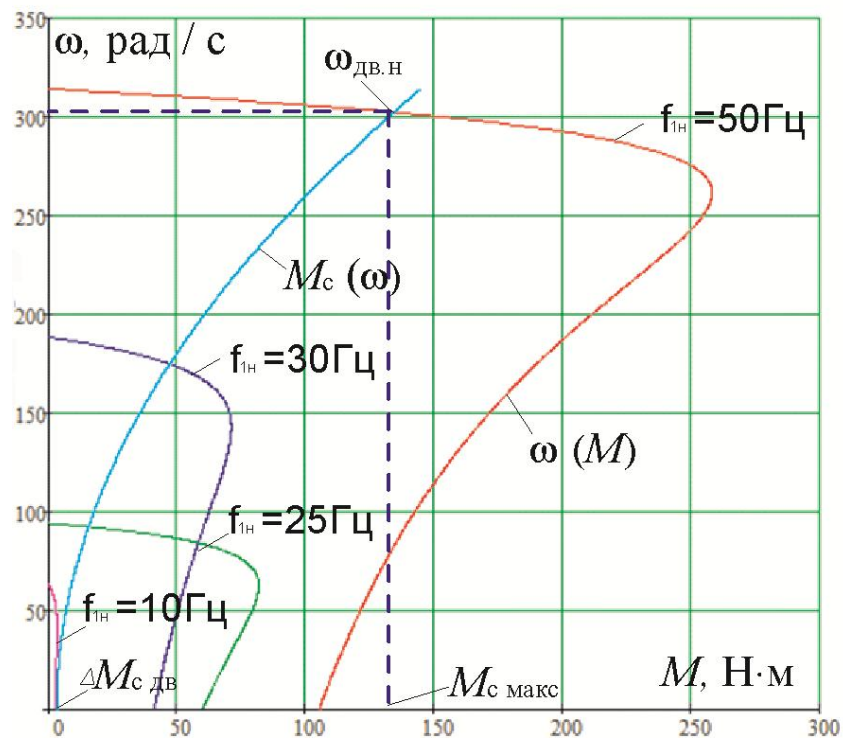


Рисунок 20- Механические характеристики $\omega(M)$ системы преобразователь – двигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$:

$$\Delta M_{с.дв} = 3,171 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_{с.макс} = M_{дв.н} = 137,171 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Анализ приведенных на рисунке 20 механических характеристик электропривода и нагрузки показывает, что при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ не удастся обеспечить пуск электропривода при выборе начальной частоты инвертора $f_{и.мин} = 10 \text{ Гц}$.

С целью обеспечения двукратного пускового момента экспериментально выполнен подбор параметров начального участка вольт-частотной характеристики преобразователя. Окончательно выбраны для

начального участка характеристики следующие параметры (рисунок 19):

$$U_{1\text{мин}} = 79.4 \text{ В}, f_{\text{и.мин}} = 10 \text{ Гц}.$$

В результате вольт-частотная характеристика представлена зависимостью

$$U_1(f_1) = U_{1\text{дон}} + (U_{1\text{фн}} - U_{1\text{дон}}) \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2 = 50 + (735 - 50) \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^2 \quad (4.3)$$

и приведена на рисунке 19 (характеристика 2).

Механические характеристики системы преобразователь – двигатель, рассчитанные по выражениям (20) с учетом выбранной настройки вольт-частотной характеристики представлены на рисунке 21

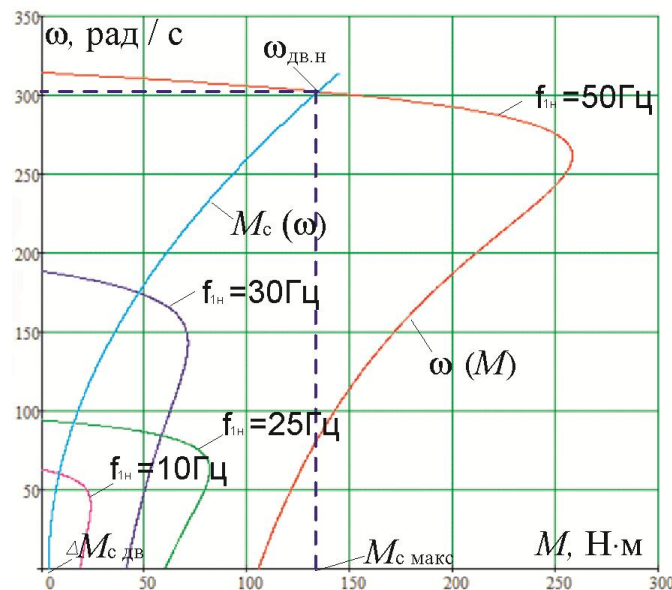


Рисунок 21- Механические характеристики $\omega(M)$ системы преобразователь – двигатель при настройке вольт-частотной характеристики в соответствии с

$$(4.3)$$

Анализ приведенных на рисунках 20 и 21 характеристик электропривода и нагрузки показывает, что при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и настройке вольт-частотной характеристики в соответствии с (4.3) асинхронный привод обеспечивает пуск насоса с начальной частоты инвертора $f_{\text{и. мин}} = 10 \text{ Гц}$, заданный диапазон регулирования скорости и не менее чем двукратную максимальную перегрузку во всём диапазоне регулирования скорости.

5. ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД СО СКАЛЯРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В силовой канал электропривода входят:

- преобразователь частоты, выполняющий функцию электрического преобразователя;
- электродвигатель, который выполняет функцию электромеханического преобразователя;
- механическая система, которая выполняет функцию механического преобразователя.[11]

При решении задач анализа и синтеза регулируемых асинхронных электроприводов обычно применяются модели электродвигателя, составленные на базе обобщенной электрической машины и выполненные в неподвижной или вращающейся двухфазной системе координат. На рисунке 5.1 приведена структурная схема силового канала непрерывной линеаризованной системы преобразователь - асинхронный электродвигатель в неподвижной системе координат. Входными координатами структурной схемы являются составляющие напряжения управления преобразователя $U_{\text{уп.}\alpha}$ и $U_{\text{уп.}\beta}$, а выходной величиной – угловая скорость двигателя ω . Структурная схема характеризуется следующими промежуточными координатами:

$U_{1\alpha}, U_{1\beta}, I_{1\alpha}, I_{1\beta}, \psi_{2\alpha}, \psi_{2\beta}$ – составляющие напряжения, тока статора и потокосцепления ротора в ортогональной системе координат α и β ;

$M_{\text{дв.эм}}$ – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

Математическое описание силового канала системы преобразователь частоты - асинхронный электродвигатель (ПЧ-АД), в неподвижной системе координат α, β , ориентированной по вектору потокосцепления ротора.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1\alpha} = R_{\Sigma} \cdot (T_{\Sigma} p + 1) \cdot I_{1\alpha} - \frac{R_2' \cdot L_{\mu}}{L_2^2} \cdot \psi_{2\alpha} - \frac{L_{\mu}}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}; \\ U_{1\beta} = R_{\Sigma} \cdot (T_{\Sigma} p + 1) \cdot I_{1\beta} - \frac{R_2' \cdot L_{\mu}}{L_2^2} \cdot \psi_{2\beta} - \frac{L_{\mu}}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}; \\ 0 = (T_2 p + 1) \cdot \psi_{2\alpha} - L_{\mu} \cdot I_{1\alpha} + \frac{L_2}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}; \\ 0 = (T_2 p + 1) \cdot \psi_{2\beta} - L_{\mu} \cdot I_{1\beta} + \frac{L_2}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}; \\ M_{\text{дв.эм}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_{\mu}}{L_2} \cdot z_p \cdot (\psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ \omega = \frac{1}{Jp} \cdot (M_{\text{дв.эм}} - M_c \cdot \text{sign}(\omega)) \end{array} \right. \quad (5.1)$$

На основании данной системы уравнений была составлена структурная схема асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат α, β и реактивной нагрузкой приведена на рисунке 22. Входными величинами на структурной схеме рисунке 22 являются напряжения переменного тока – фазные напряжения статорных обмоток двухфазного АД:

$$U_{1\alpha}(t) = U_{1m} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t); \quad U_{1\beta}(t) = U_{1m} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t). \quad (5.2)$$

Параметры звеньев структурной схемы двигателя.

Эквивалентные индуктивности обмоток:

– статора

$$L_1 = L_{1\delta} + L_{\mu} = 0,0084 + 0,211 = 0,2194 \text{ Гн}, \quad (5.3)$$

– ротора

$$L_2 = L'_{2\delta} + L_{\mu} = 0,011 + 0,211 = 0,222 \text{ Гн}. \quad (5.4)$$

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - \frac{L_{\mu}^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0,211^2}{0,2194 \cdot 0,222} = 0,086. \quad (5.5)$$

Эквивалентное сопротивление

$$R_3 = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_{\mu}^2}{L_2^2} = 2,995 + 1,167 \cdot \frac{0,211^2}{0,222^2} = 4,049 \text{ Ом}. \quad (5.6)$$

Электромагнитные постоянные времени

$$T_3 = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_3} = \frac{0,086 \cdot 0,2194}{4,049} = 0,0046 \text{ с}; \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2'} = \frac{0,222}{1,167} = 0,19 \text{ с}. \quad (5.7)$$

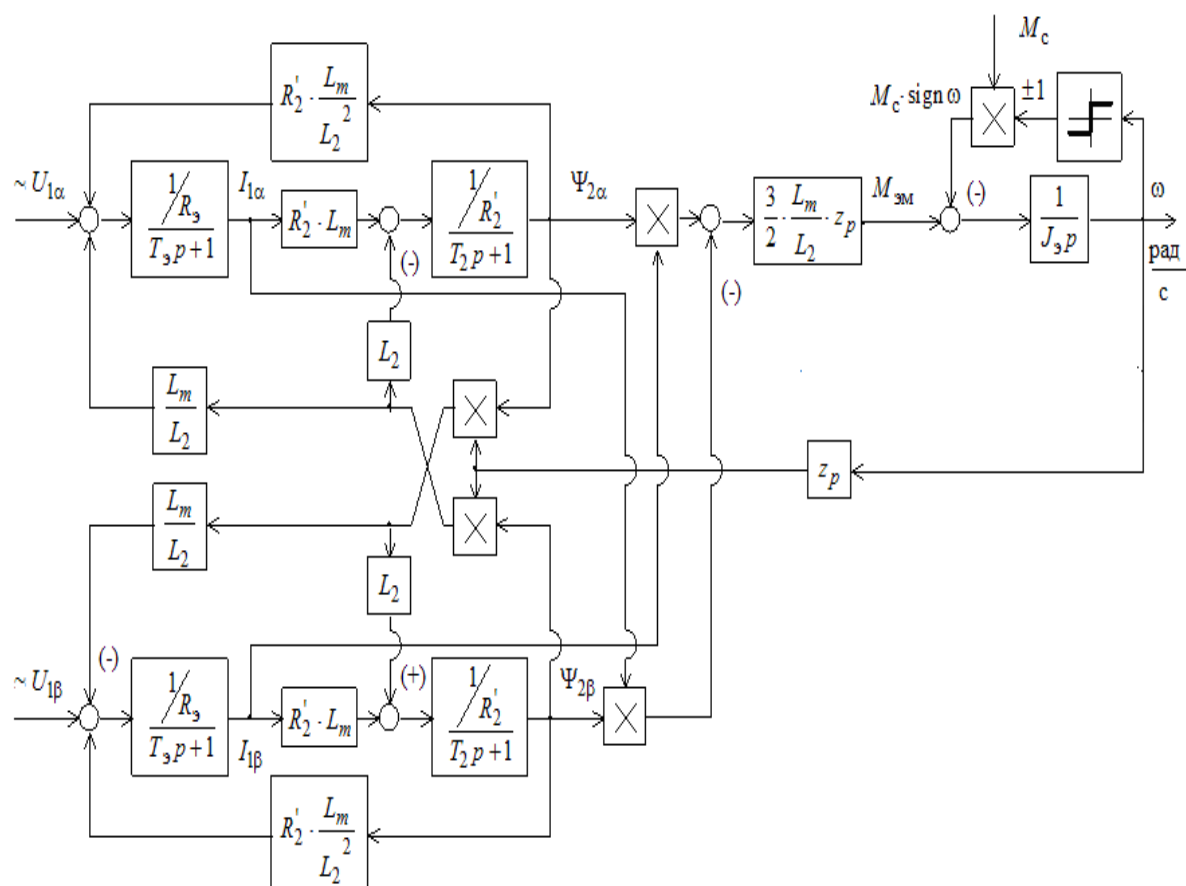


Рисунок 22 - Структурная схема силового канала системы ПЧ-АД в неподвижной двухфазной системе координат α, β

В пакете Simulink системы Matlab разработана имитационная модель силового канала системы преобразователь - асинхронный электродвигатель в неподвижной системе координат [12].

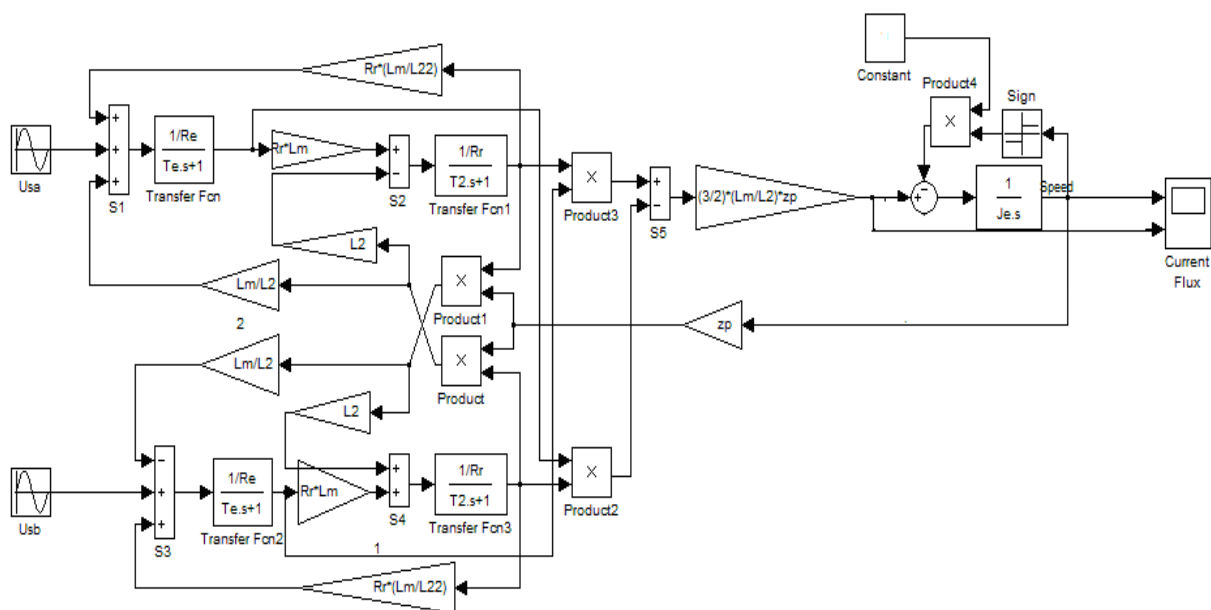


Рисунок 23 – Имитационная модель силового канала системы ПЧ-АД

В библиотеке SimPowerSystem пакета Simulink системы MatLab имеется готовая модель АД. Имитационная модель прямого пуска АД на ее основе приведена на рисунке 24.

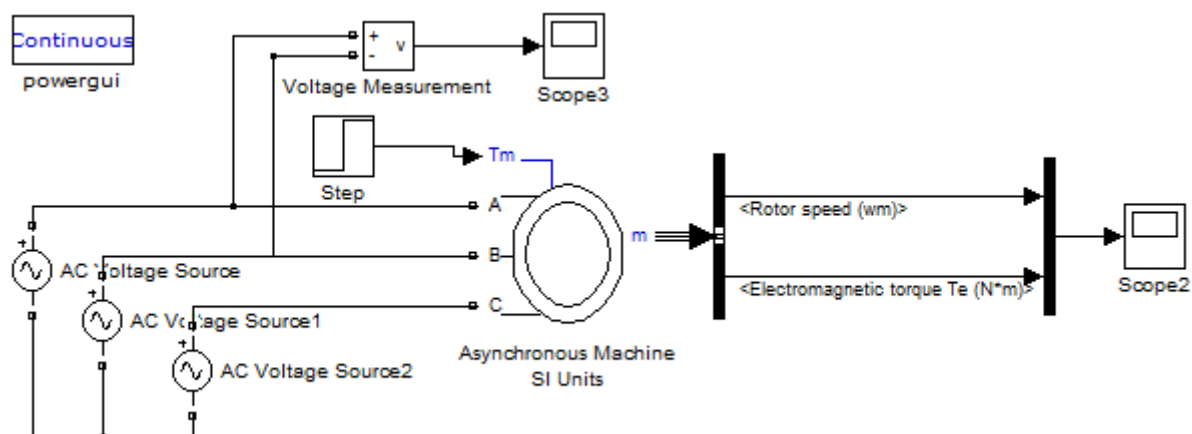


Рисунок 24 - Имитационная модель прямого пуска асинхронного двигателя

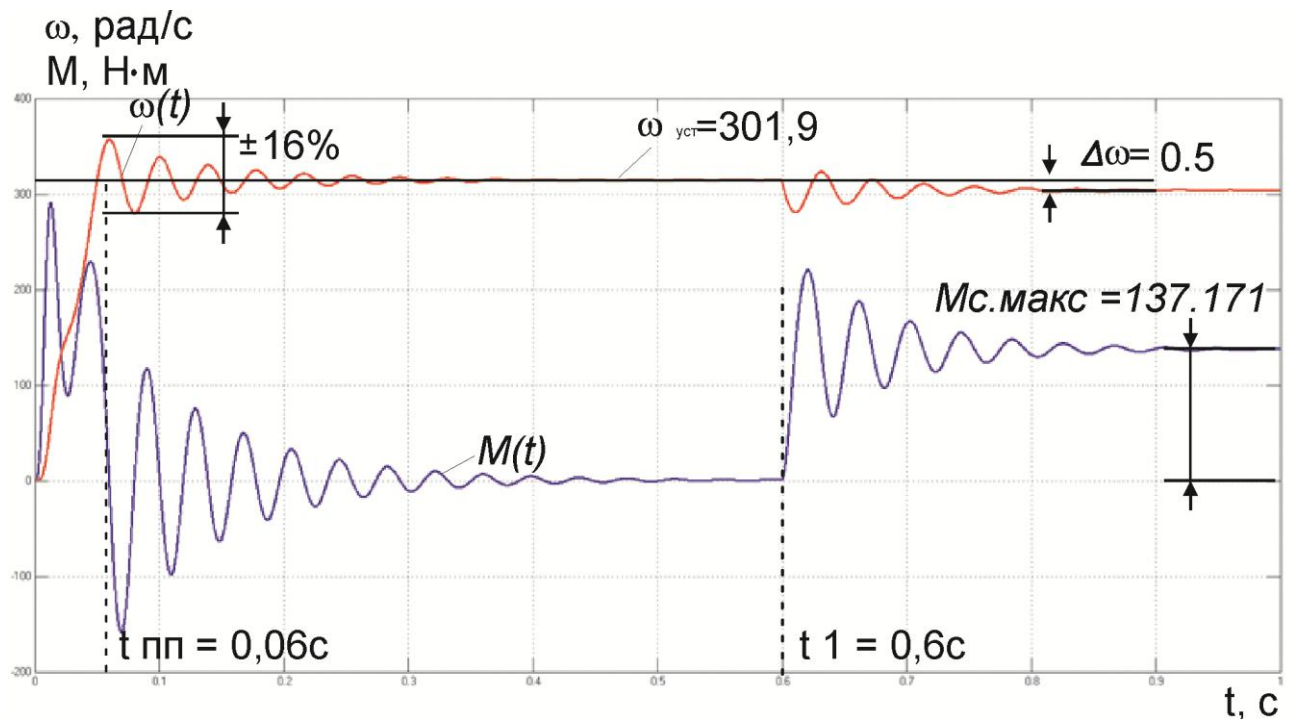


Рисунок 25 - Переходные характеристики скорости ротора и электромагнитного момента АД при прямом пуске, набросе нагрузки $M_{с.макс} = 137,171 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Сравнивая переходные процессы, имитационной модели силового канала системы ПЧ – АД собранной в Simulink на основании системы уравнений, и имитационной модели с использованием готовой модели асинхронного двигателя, можно заметить, что переходные процессы в обоих случаях протекают фактически идентично. Поэтому при разработке модели системы скалярного частотного управления достаточно использовать готовую модель АД из библиотеки SimPowerSystem, пакета Simulink, системы MatLab.

5.1 Функциональная схема системы скалярного частотного управления

В приводах длительного режима работы с постоянной скоростью, диапазоном регулирования скорости не больше 1:10 и без особых требований к динамике целесообразно применение простейших структур и законов частотного управления [13].

В простейшем случае частотно-регулируемый асинхронный электропривод со скалярным управлением реализуется по разомкнутой структуре.

Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением, выполненная по разомкнутой структуре, приведена на рисунке 26, для двухфазного АД в неподвижной системе координат α, β [14]. На функциональной схеме символом * обозначены сигналы задания и управления и приняты следующие обозначения:

ω - фактическое значение угловой скорости вращения двигателя;

ЗИС - задатчик интенсивности скорости с линейной характеристикой;

ФНУ 1 - формирователь напряжений управления двухфазным АД, который формирует два напряжения переменного тока U_α^* и U_β^* при применении структурной схемы АД в неподвижной системе координат статора α, β

ФНУ 2 - преобразователь напряжений управления двухфазным двигателем в напряжения управления трехфазным двигателем.

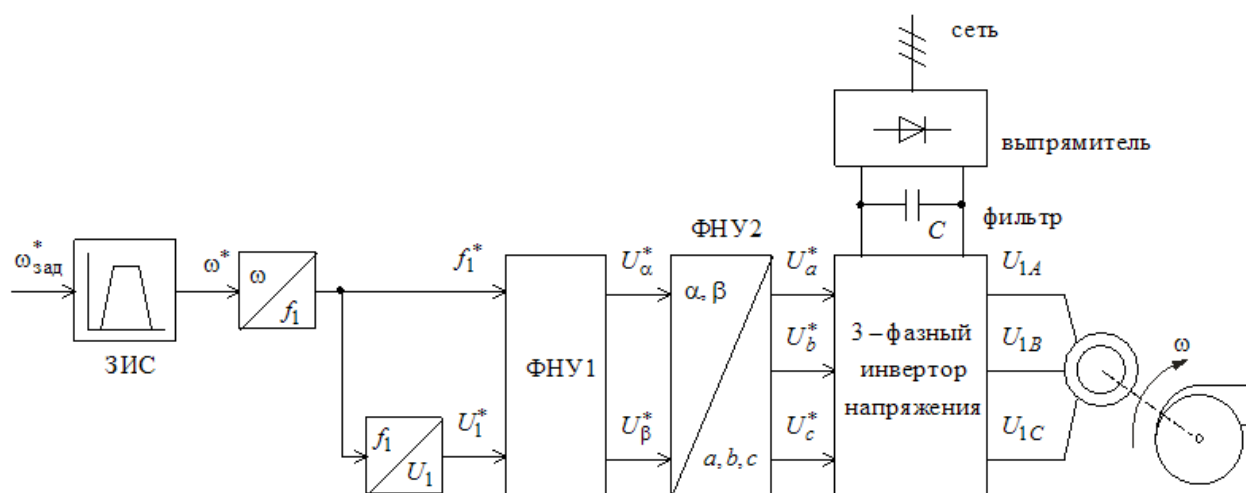


Рисунок 26 - Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением

В разомкнутой системе электропривода со скалярным управлением при уменьшении частоты максимальный момент двигателя уменьшается.

Основная причина этого – возрастания влияния активного сопротивления обмотки статора при снижении частоты питающего напряжения. При законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$, как было показано выше, с целью обеспечения пускового момента на малых скоростях в преобразователе должна быть предусмотрена функция коррективки (повышение начального значения напряжения) вольт-частотной характеристики в области малых частот выходного напряжения инвертора. Либо можно применить так называемую IR - компенсацию (повышение фазного напряжения инвертора на величину падения напряжения на обмотке статора $I_l \cdot R_l$) в области малых частот.

Функциональная схема системы скалярного частотного управления приведена на рисунке 27.

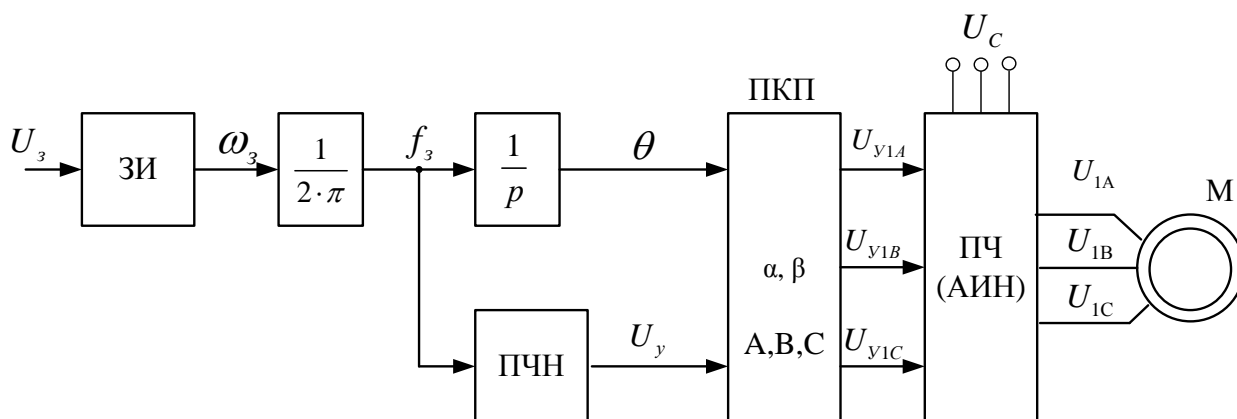


Рисунок 27 - Функциональная схема системы скалярного частотного управления

Для ограничения момента двигателя в пуско-тормозных режимах электропривода механизмов, у которых по технологии невозможны механические перегрузки (к таким механизмам можно отнести привод насосов), достаточно применения задатчика интенсивности с линейной характеристикой, который устанавливается на входе электропривода в канале задания скорости.

Задатчик интенсивности формирует кривую и темп разгона двигателя. Сигналом задания скорости является задающее напряжение U_3 . Ему соответствует задающая частота f_3 . Блок “преобразователь частота-напряжение” ПЧН формирует требуемую зависимость скалярного управления между частотой и напряжением преобразователя, чем и устанавливается принятый закон частотного регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const.}$ Блок ПКП – блок прямого координатного преобразователя формирует трехфазную систему управляющих напряжений для управления автономным инвертором напряжения (АИН) преобразователя частоты. Система силовых трехфазных напряжений U_{1A}, U_{1B}, U_{1C} с выхода ПЧ затем подается на АД.

В соответствии с функциональной схемой, представленной на рисунке 27, составим имитационную модель привода в среде Simulink системы MatLab.

Имитационные модели входящих в нее блоков представлены на рисунках 28-30.

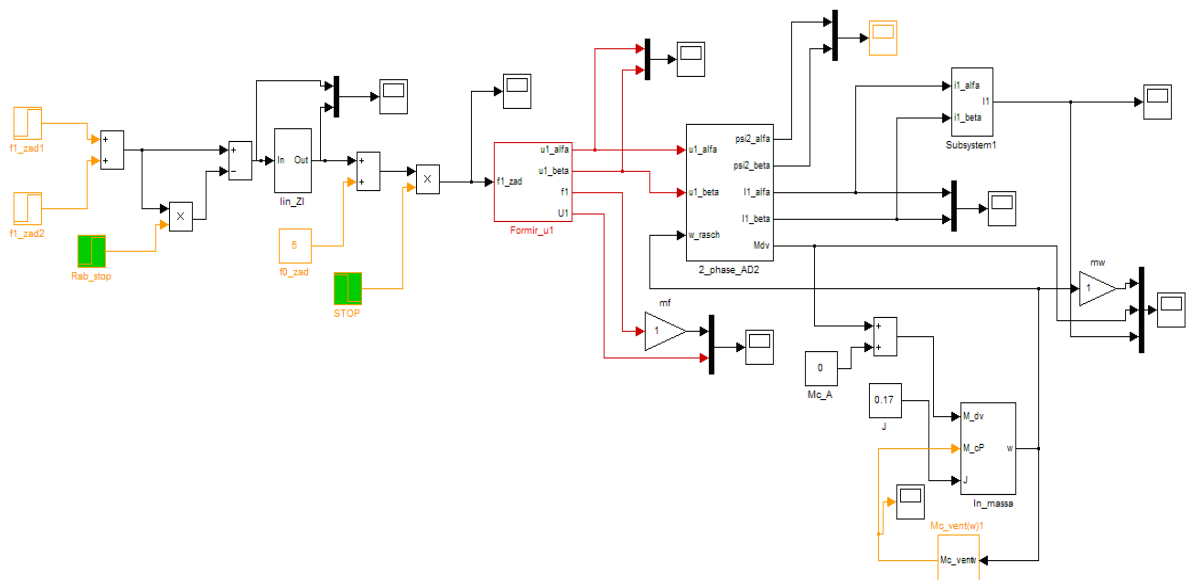


Рисунок 28–Имитационная модель разомкнутой системы ПЧ-АД со скалярным управлением

Имитационная модель, представляющая вентиляторную нагрузку, согласно выражению(2.5)

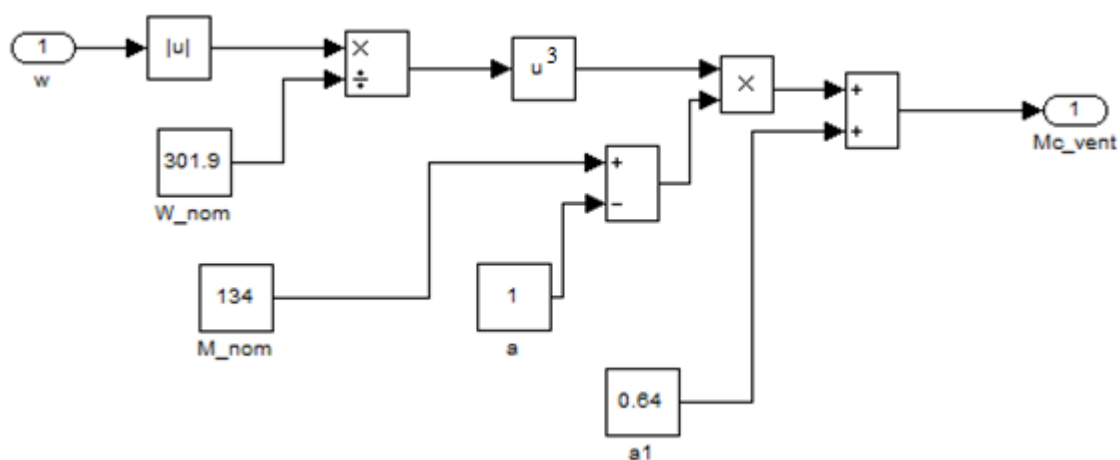


Рисунок 29 – Имитационная модель вентиляторной нагрузки

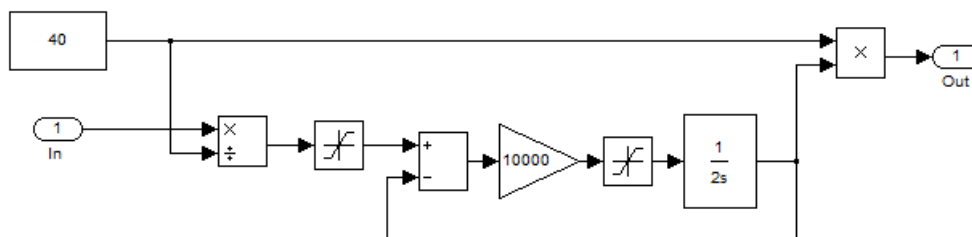


Рисунок 30 – Имитационная модель датчика интенсивности с линейной выходной характеристикой

Определим передаточные функции входящих в нее блоков.

На рисунке 31 представлены математически рассчитанная и аппроксимированная ломаными линиями кривая зависимости $U_1 / f_1^2 = \text{const.}$

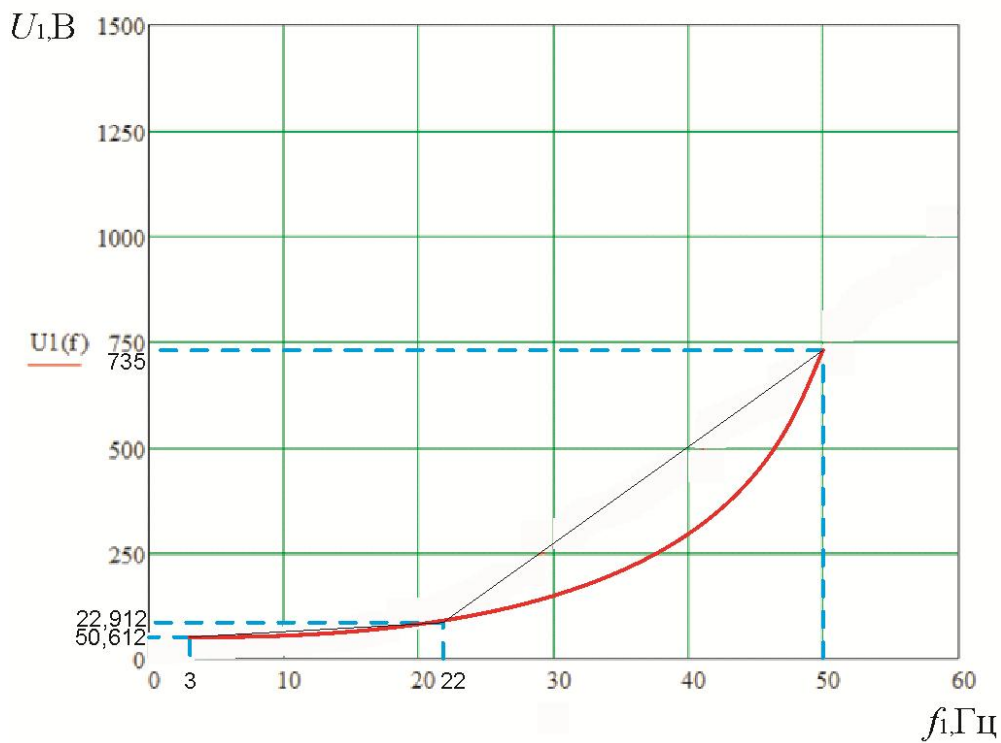


Рисунок 31 - Кривая зависимости $U_1(f_1)$

Кривая задается в блоке ПЧН тремя точками и представлена в таблице

6.

$$U_{1j}(f_{1j}) = U_{\pi} + (U_1 - U_{\pi}) \cdot \left(\frac{f_{1j}}{f_1}\right)^2, \quad (5.8)$$

$$U_{11}(f_{11}) = 50 + (735 - 50) \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^2 = 735 \text{ В}, \quad (5.9)$$

$$U_{12}(f_{12}) = 50 + (220 - 50) \cdot \left(\frac{22}{50}\right)^2 = 82,912 \text{ В}, \quad (5.10)$$

$$U_{13}(f_{13}) = 50 + (220 - 50) \cdot \left(\frac{3}{50}\right)^2 = 50,612 \text{ В}, \quad (5.11)$$

Таблица 6 – Параметры вольт-частотной характеристики преобразователя

$f_1, \text{Гц}$	3	22	50
$U_1, \text{В}$	50,612	82,912	735

Имитацию квантования по времени фазных напряжений на выходе автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, происходящее

в процессе его широко-импульсной модуляции (ШИМ) производится с помощью стандартных блоков библиотеки *Simulink:PulseGenerator* и *EnabledSubsystem*[10].

Период квантования по времени напряжения инвертора ПЧ принимаем равным величине постоянной времени запаздывания при ШИМ

$$T_3 = \frac{1}{f_{in}} = \frac{1}{10000} = 0,0001 \text{ с}, \quad (5.12)$$

где $f_{in} = 10000$ - несущая частота инвертора.

5.2 Имитационные исследования частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса со скалярным управлением

Имитационные исследования электропривода насоса проводятся с целью проверки его работоспособности в следующих основных технологических режимах: пуск на любую рабочую скорость насоса; переход с одной рабочей скорости насоса на другую и останов насоса в режиме электрического торможения. В процессе имитационных исследований рассмотрим следующие режимы работы системы электропривод – насос:

- пуск электропривода на минимальную рабочую скорость;
- пуск электропривода с минимальной рабочей скорости на максимальную;
- торможение электропривода с максимальной скорости до минимальной;
- останов электропривода.

К электроприводу насоса не предъявляется жестких требований к динамическим показателям. Поэтому при выборе параметров настройки задатчика интенсивности скорости прежде всего следует исходить из условия обеспечения мягкого пуска электропривода. В ходе имитационных

экспериментов установлено, что для обеспечения мягкого пуска насоса достаточно принять постоянную времени задатчика $T_{\text{зи}} = 1 \text{ с}$.

В качестве примера рассмотрена отработка электроприводом насоса следующего цикла:

- пуск на минимальную частоту $f_{\text{и. мин}} = 10 \text{ Гц}$
- переход на максимальную рабочую скорость насоса ($f_{\text{р. макс}} = 50 \text{ Гц}$)
- переход на минимальную частоту $f_{\text{и. мин}} = 10 \text{ Гц}$.
- останов электропривода.

На рисунке 32 приведены временные характеристики отработки электроприводом насоса с законом регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и настройкой вольт-частотной характеристики в соответствии с (таб.5) принятого цикла работы.

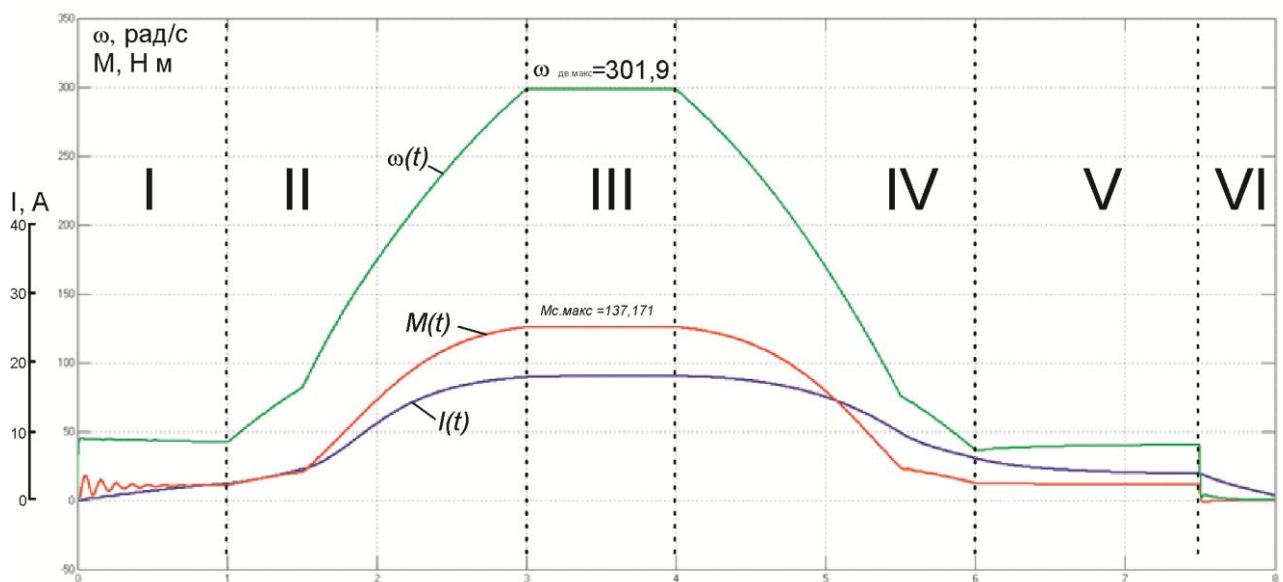


Рисунок 32 — Результаты имитационных исследований отработки электроприводом насоса заданного цикла при настройке вольт-частотной

характеристики в соответствии с (таб.5): графики переходных процессов $\dot{I}(t)$ -момента, $\omega(t)$ - скорости электропривода

5.3. Имитационное исследование длинной линии.

На рисунке 33- представлена имитационная модель «асинхронный двигатель-кабельная линия»[15]

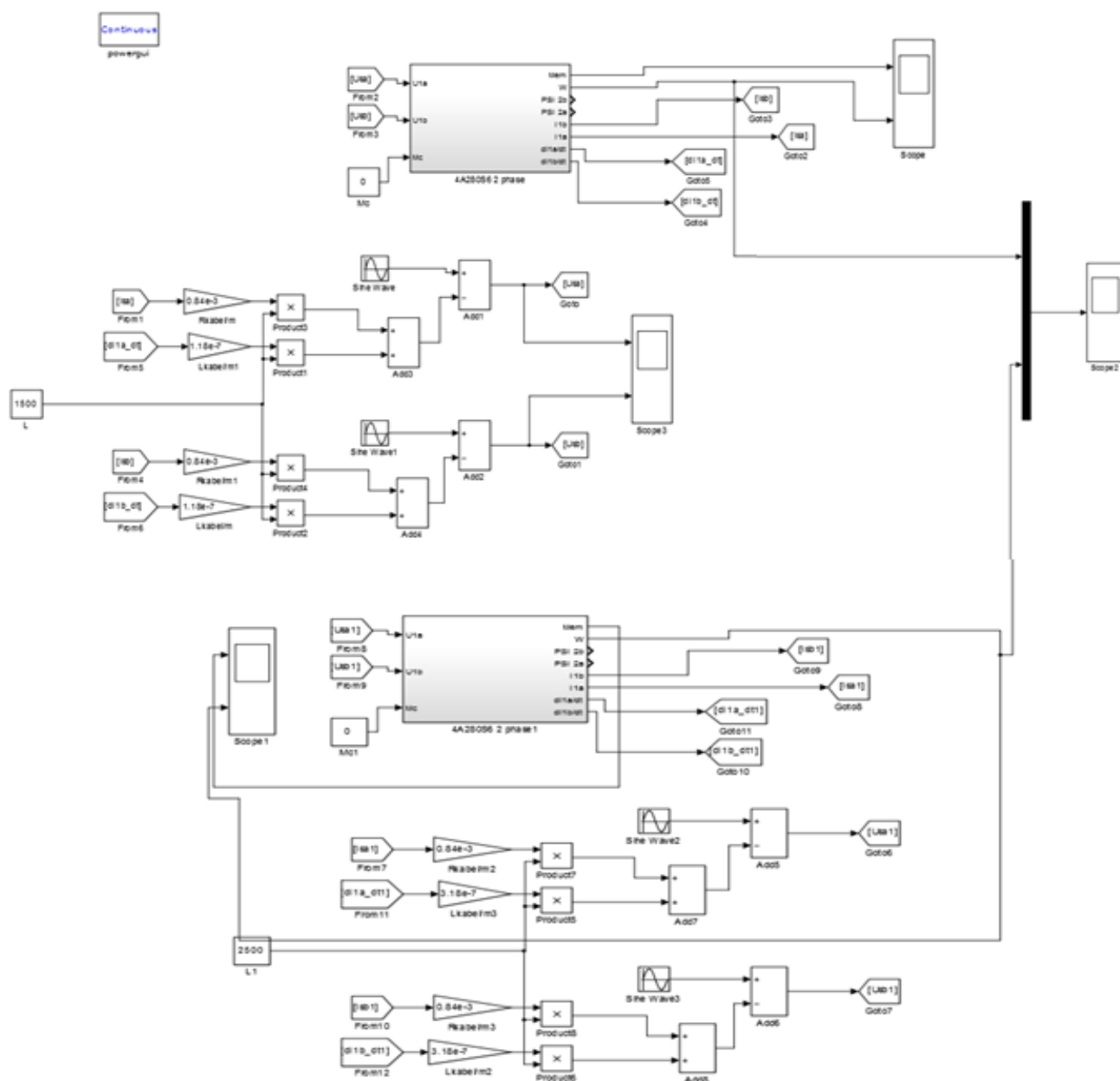


Рисунок 33- Имитационная модель системы «асинхронный двигатель-кабельная линия».

Результаты моделирования «длинной линии» представлены на рисунке 34.

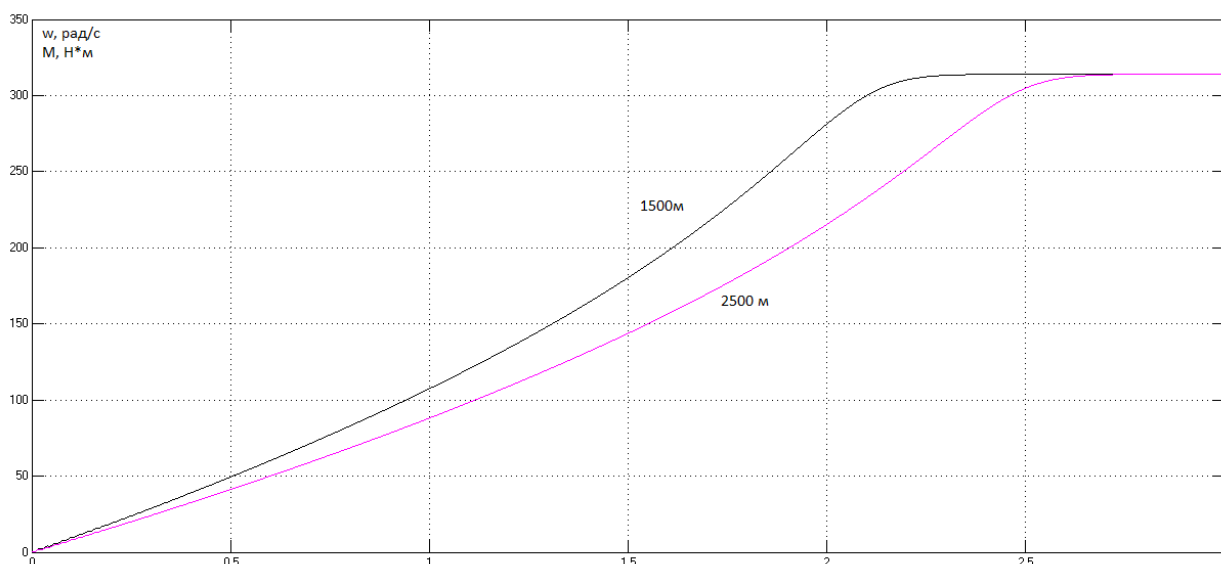


Рисунок 34- Результаты моделирования «длинной линии»

Вывод: Полученные результаты имитационных исследований доказывают, что частотно-регулируемый асинхронный электропривод насоса под насосной нагрузкой при скалярном управлении с законом управления $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и корректировкой вольт-частотной характеристики, обеспечивает пуск электропривода с начальной частоты $f_{\text{и. мин}} = 10 \text{ Гц}$ и требуемый диапазон регулирования скорости насоса. Переходные процессы в электроприводе протекают плавно с ограничением динамического момента, токов двигателя и преобразователя. Время пуска и электрического торможения электропривода определяется и может быть изменено путём выбора значения постоянной времени задатчика скорости. Также были произведены имитационные исследования системы «асинхронный двигатель-кабельная линия». Анализ показывает что существуют предельные значения длинной линии питающего кабеля, при повышении которой пуск асинхронного двигателя становится невозможным. При длине линии 2500 м, пуск подучается слишком затянутым (рисунок 34). Время переходного процесса составляет примерно 2.6 с, это может привести к выходу из строя асинхронного двигателя из за больших токов, протекающих в нем при разгоне. Также при увеличении кабельной линии активные и реактивные

сопротивления проводной части становятся соизмеримыми с сопротивлениями двигателя, что приводит к уменьшению частоты вращения двигателя при номинальной нагрузке.

5.4 Анализ неисправностей ЭЦН

К основным неисправностям ЭЦН можно отнести следующие неисправности: - реже всего выходит из строя гидрозащита, основной поломкой является прорыв резиновой диафрагмы; - двигатели выходят из строя из-за пробоя статора нижнего или верхнего оснований, а также коррозии корпуса; - насос выходит из строя чаще всего из-за засорения мехпримесями, быстро изнашивается вал насоса[16]. Анализ причин преждевременных отказов фонда скважин оборудованных ЭЦН отображается следующими показателями: - до 17% отказов приходится на некачественную работу бригад подземного ремонта скважин, где нарушаются регламенты спускоподъемных операций; как следствие это приводит к повреждению кабеля, некачественному монтажу ЭЦН, негерметичности НКТ, плохой промывке скважин; - около 18% отказов приходится на долю скважин работающих в периодическом режиме, вызванных слабым притоком, а также не соответствием типоразмера насосов с условиями эксплуатации; - в 13% отказов причины не были выявлены, т. к. нарушался регламент проведения расследования; - примерно 10% отказов происходят из-за отложений твердых асфальто-смолинисто-парафиновых отложений вместе с окалиной, песком, глинистыми частицами и ржавчиной; - около 9% отказов из-за выноса пропана в скважинах после гидравлического разрыва пласта, что приводит к заклиниванию валов и выводу из строя насосов; - до 8% отказов происходит по причине бесконтрольной; - только 6% отказов происходит по причине отсутствия контроля за выводом установок на режим; - в 5% случаях отказ происходил из-за заводского брака, скрытых дефектов, некачественных комплектаций погружного и наземного насосного оборудования; - на остальные 14% приходятся прочие неисправности. Рассмотрим другие неисправности, возникающие при использовании скважины с ЭЦН. В настоящее время основными методами борьбы с негативным влиянием газа на работу УЭЦН являются: — применение на приеме насоса газосепараторов различных конструкций (гравитационный, вихревой, центробежный); центробежный газосепаратор

является самым надежным средством защиты ЭЦН от вредного влияния свободного газа; основным недостатком данного метода является то, что эффективность устройства в моменты поступления на прием насоса большого количества газа мала; кроме того, газовый сепаратор имеет недостаточную пропускную способность по жидкости, что приводит к снижению производительности установки в целом; — монтаж на приеме насоса диспергирующих устройств; основным достоинством данного метода является то, что при прохождении жидкости через устройство повышается ее однородность и степень измельченности газовых включений, что приводит к снижению вибрации и пульсаций насоса, однако этот метод не позволяет решить проблему оттеснения динамического уровня газом; применение диспергаторов наиболее рационально для высокопроизводительных установок, так как они обеспечивают наибольший КПД; — спуск насоса в зону, где давление на приеме насоса равно давлению насыщения нефти газом; этот метод широко распространен, так как весьма прост технологически и организационно, но является неэкономичным, поскольку требует спуска насоса на большие глубины, что приводит к дополнительному расходу НКТ и электропогружного кабеля, повышению нагрузки на колонну НКТ. Сложность оперативного управления насосами в условиях повышенной обводненности и высокого газового фактора заключается в том, что в одном случае необходимо использовать насос в условиях повышенной вязкости, в другом — наоборот, т. е. в условиях низковязкой среды. На данный момент влияние вязкости на работу насоса изучено не до конца. Для решения этой проблемы могут использоваться модели и методы, ограниченные двумя противоположными, учитывающими обе эти особенности, условиями. В качестве решения поставленной задачи может быть предложено поддержание заданного динамического уровня скважины, регулирование которого возможно на основе создания модели, учитывающей технологические параметры системы «УЭЦН — скважина» и электрические параметры погружного электродвигателя. На основе электрических параметров мы имеем возможность косвенно отслеживать нагрузку на валу насоса и отслеживать степень загрузки насоса, а на основе технологических параметров — возможность контролировать производительность установки. Поддержание заданного динамического уровня, таким образом, будет являться компромиссом между бесперебойной работой насоса и обеспечением наибольшей производительности установки. Опыт эксплуатации УЭЦН показал, что требуется постоянный контроль их технического состояния в связи с частыми поломками и отказами оборудования в процессе добычи. Причинами отказов установки являются

особенности ее конструкции: – протяженность установки при малом диаметре, что повышает ее податливость и снижает динамическую жесткость; – некачественное изготовление узлов и деталей установки (около 5% всех отказов); – высокий процент ошибок при сборке установки. Кроме того, большая доля отказов установки происходит в результате действия дефектов ПЭД и ЦН. скважины. Как было рассмотрено ранее, в основном, из строя выходят ПЭД и ЦН. Рассмотрим более подробно возможность сокращения отказов ПЭД. Практика эксплуатации ПЭД показывает, что повышение срока службы, надежности и увеличение межремонтного периода за счет своевременной диагностики, оценки и прогнозирования технического состояния дает значительно больший экономический эффект, чем улучшение других технико-экономических показателей: КПД, коэффициента мощности, коэффициента использования и т. д. В связи с этим растет интерес к системам, позволяющим оценить техническое состояние оборудования перед спуском его для добычи нефти. В настоящее время существуют системы, предназначенные для диагностики электрических машин, способные производить измерения различных параметров (вибрация, температура) в нескольких точках оборудования. Однако не рассматривались вопросы создания многоканальных и многоточечных систем диагностики ПЭД, которые позволяют осуществить контроль технического состояния непосредственно в рабочей среде. Поэтому разработка и внедрение информационно-измерительной системы диагностики ПЭД на основе распределенных средств измерения является актуальной задачей. К таким системам относятся СПТ, являющиеся нижним уровнем рассматриваемой системы автоматизации ЭЦН. В России системы погружной телеметрии разрабатываются и производятся несколькими компаниями. Основные производители – это ООО «Борец», ОАО «Ижевский радиозавод», ЗАО «Электон», Завод «Прибор», ЗАО «Новомет-Пермь» и ОАО «АЛНАС»

6. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данного проекта является разработка регулируемого электропривода погружного насосного агрегата для откачки пластовой жидкости. В результате исполнения полученная система отвечает всем техническим параметрам

6.1 Организация работ технического проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках технического задания;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения работ.

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и инженер. На каждый вид запланированных работ установлена соответствующая должность исполнителя.

Номерам этапов соответствуют следующие виды выполняемых работ, представленные в таблице 6.

Таблица 6 – Контрольные события проекта

Основные этапы	№	Содержание работ	Исполнитель	Время исполнения проекта, (дн)
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель, инженер	3
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	5
	3	Изучение уже существующих решений в данной области	Инженер	5
	4	Изучение зарубежной	Инженер	4

		литературы		
	5	Выбор направления исследований	Научный руководитель, инженер	5
	6	Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель, инженер	5
Теоретические и экспериментальные исследования	7	Расчет параметров оборудования	Инженер	15
	8	Разработка системы регулирования	Инженер	14
	9	Исследование по части «Социальная ответственность»	Инженер, координатор по части «Социальная ответственность»	7
	10	Исследование по части «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Инженер, координатор по части «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	8
	11	Имитационное моделирование	Научный руководитель, инженер	17
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, инженер	2
	13	Оценка целесообразности проведения дальнейших исследований по данной теме	Научный руководитель, инженер	3
Итого				93

Продолжительность выполнения проекта составит 93 рабочий день.

Из них:

9 дней – продолжительность выполнения работ руководителем;

93 день – продолжительность выполнения работ инженером.

Наиболее удобным и наглядным в данном случае является построение ленточного графика проведения технических работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками,

характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ [19].

График строится для ожидаемого по длительности исполнения работ в рамках технического проекта, с разбивкой по месяцам и декадам за период времени подготовки магистерской диссертации.

Исходя из составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 13 декад, начиная с первой декады февраля, заканчивая первой декадой июня. Учитывая вероятностный характер оценки трудоемкости, реальная продолжительность работ может быть как меньше (при благоприятном стечении обстоятельств), так и несколько превысить указанную продолжительность (при неблагоприятном стечении обстоятельств).

Далее по диаграмме Ганта можно предварительно оценить показатели рабочего времени для каждого исполнителя.

Таблица 7 – Календарный план-график

№	Вид работ	$T_{k,i}$, кал дн.	Продолжительность выполнения работ														
			Февр			Март			Апр			Май			Июнь		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение технического задания	3,5	■														
2	Подбор и изучение материалов по теме	5,6		■	■	■	■	■									
3	Изучение уже существующих решений в данной области	5,2						■	■	■							
4	Изучение зарубежной литературы	4,2							■	■	■						

где $K_{\text{мат}}$ – материальные затраты;

$K_{\text{ам}}$ – амортизация компьютерной техники;

$K_{\text{з/пл}}$ – затраты на заработную плату;

$K_{\text{с.о.}}$ – затраты на социальные нужды;

$K_{\text{пр}}$ – прочие затраты;

$K_{\text{накл}}$ – накладные затраты.

6.2.1 Материальные затраты

В данной работе материальные затраты принимаем в размере 1000 рублей на канцелярские товары.

6.2.2 Затраты на амортизацию

Так как для работы над магистерской диссертацией используется компьютерная техника, посчитаем ее амортизацию.

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.кт}}}{T_{\text{кал}}} \cdot C_{\text{кт}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}}, \text{ где} \quad (6.2.2.1)$$

$T_{\text{исп.кт}}$ – время использования компьютерной техники (90 дней);

$T_{\text{кал}}$ – календарное время (365 дней);

$C_{\text{кт}}$ – цена компьютерной техники (25000 руб);

$T_{\text{сл}}$ – срок службы компьютерной техники (5 лет).

$$K_{\text{ам}} = \frac{90}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 1233 \text{ руб.} \quad (6.2.2.2)$$

6.2.3 Затраты на заработную плату

Вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также компенсационные и стимулирующие выплаты, затраты на заработную плату (для инженера и НР).

$$Kз / пл = ЗП_{инж} + ЗП_{НР} \quad (6.2.3.1)$$

$$ЗП_{мес} = ЗП_0 \cdot K1 \cdot K2, \text{ где} \quad (6.2.3.2)$$

$K1$ – коэффициент, учитывающий отпуск ($1,1 = 10\%$);

$K2$ – районный коэффициент ($1,3 = 30\%$);

$ЗП_0$ – месячный отклад (для профессора 27000 р., для инженера 17000р.).

Для научного руководителя:

$$ЗП_{мес} = 27000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 38610 \quad (6.2.3.3)$$

Для инженера:

$$ЗП_{мес} = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.} \quad (6.2.3.4)$$

$$ЗП_{ор} = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n, \text{ где} \quad (6.2.3.5)$$

21 – число рабочих дней в месяц;

n – фактическое число дней в проекте.

Для научного руководителя:

$$ЗП_{ор} = \frac{38610}{21} \cdot 10 = 18385 \quad (6.2.3.6)$$

Для инженера:

$$ЗП_{ор} = \frac{24310}{21} \cdot 101 = 116920 \text{ руб.} \quad (6.2.3.7)$$

$$K_{з/пл} = 18610 + 116920 = 135530 \text{ руб} \quad (6.2.3.8)$$

6.2.4 Затраты на социальные нужды

Затраты организации по обязательным и добровольным взносам в органы государственного страхования, пенсионного фонда, фонда медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, занятых в производстве продукции, работ, услуг в непроизводственной сфере в соответствии с порядком, установленным законодательством.

Затраты на социальные нужды берем в размере 30% от $K_{з/пл}$.

$$K_{с.о.} = \frac{\frac{K_{з/пл} * 30\%}{100\%}}{1} = \frac{135530 * 0,3}{1} = 40659 \text{ руб.} \quad (6.2.4.1)$$

6.2.5 Прочие затраты

Прочие затраты принимаются в размере 10% от $(K_{мат} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о})$

$$K_{пр} = \frac{\frac{K_{мат} + K_{ам} + \frac{K_{з/пл}}{пл} + K_{с.о.}) * 10\%}{100\%}}{1} = \frac{(1000 + 1233 + 135530 + 40659) * 0,1}{1} = 17842 \text{ руб.} \quad (6.2.5.1)$$

6.2.6 Накладные затраты

Затраты, не связанные прямо с производством отдельного изделия или вида работы и относимые на весь выпуск продукции. К ним относятся: расходы на содержание, эксплуатацию и текущий ремонт зданий, сооружений и оборудования; отчисления на социальное страхование и другие обязательные платежи; содержание и заработную плату административно-управленческого персонала; расходы, связанные с потерями от брака и простоев и др.

Накладные расходы принимаются в размере 200% от $K_{з/пл}$.

$$K_{накл} = \frac{\frac{K_{з}}{пл} * 200\%}{100\%} = \frac{135530 * 2}{1} = 271060 \text{ руб.} \quad (6.2.6.1)$$

Сведем полученные результаты в таблицу.

Таблица 8 – Смета затрат на проект

№	Элементы затрат	Стоимость, руб.
1	Материальные затраты	1000
2	Амортизация компьютерной техники	1233
3	Затраты на заработную плату	135530
4	Затраты на социальные нужды	40659
5	Прочие затраты	17842
6	Накладные расходы	271060
	Итого:	467324

Смета затрат на проект:

$$K_{тп} = K_{мат} + K_{ам} + \frac{K_{з}}{пл} + K_{с.о.} + K_{пр} + K_{накл} = 1000 + 1233 + 135530 + 40659 + 17842 + 271060 = 467324 \text{ руб.} \quad (6.2.1)$$

6.3. Определение экономической эффективности проекта

Для определения срока окупаемости проекта необходимо рассчитать затраты на предусмотренное оборудование, монтажные работы. Смета затрат на оборудование представлена в таблице 9.

Таблица 9 – Смета затрат на оборудование

№	Наименование оборудования	Сумма, руб.
1	Электроцентробежный насос	49 000 000
2	Преобразователь частоты	10 000 000
3	Кабель	4 000 000
4	Вспомогательное оборудование	5 000 000
5	Монтажные работы	100 000 000
	Итого:	168 000 000

Известно, что ежемесячный экономический эффект составляет почти 3 млн. рублей без учёта прибыли от утилизации попутного нефтяного газа, тогда срок окупаемости проекта составит:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{пр}} + K_{\text{об}} + K_{\text{монт}}}{\text{Э}_{\text{год}} - \text{И}_{\text{год}}} = \frac{168\,000\,000}{36\,000\,000 - 6\,600\,000} = 5,7 \text{ (лет)} \quad (6.3.1)$$

$K_{\text{пр}}$ – капитальные вложения в проект;

$K_{\text{об}}$ – капитальное вложение в оборудование;

$K_{\text{монт}}$ – Капитальные вложения в монтажные работы;

$\text{Э}_{\text{год}}$ – Годовой экономический эффект;

$\text{И}_{\text{год}}$ – Годовые эксплуатационные издержки.

Подводя итоги, можно сделать вывод о том, что исследуемый проект стоимостью 168 миллионов рублей является экономически эффективным и срок окупаемости составит 5,7 лет без учета прибыли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной магистерской диссертации была разработана и исследована с помощью программы MATLAB математическая модель погружного асинхронного электродвигателя, имитационная модель разомкнутой системы ПЧ-АД со скалярным управлением. В ходе разработки и выполнения проекта был осуществлен выбор оборудования. Выбор и расчет параметров погружного электродвигателя. Предложено использовать современный асинхронный частотно-регулируемый электропривод. Выбран электродвигатель серии ПЭДН 40-117, преобразователь частоты Электрон-05-400.

Получены механические и электромеханические характеристики выбранного асинхронного двигателя, построенные по расчетным и каталожным значениям. В качестве закона управления, для преобразователя частоты выбран закон регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$.

Также произведено моделирование переходных процессов при пуске двигателя в программной среде MATLAB С использованием имитационных моделей построены динамические характеристик, а также произведены имитационные исследование системы «асинхронный двигатель-кабельная линия». Анализ показывает, что существуют предельные значения длинной линии питающего кабеля, при повышении которой пуск асинхронного двигателя становится невозможным. Была выбрана система со скалярным управлением и законом $U_1/f_1^2 = \text{const}$, с целью обеспечения пускового момента на малых скоростях в преобразователе предусмотрена функция корректировки (повышение начального значения напряжения) вольт-частотной характеристики в области малых частот выходного напряжения инвертора. По результатам, полученным в ходе моделирования, были сделаны выводы.

Спроектированная система удовлетворяет требованиям технического задания. В экономической части произведена оценка затрат на проектирование. В разделе безопасности и экологичности проанализированы опасные и вредные производственные факторы, даны практические рекомендации по технике безопасности и производственной санитарии.

Список использованных источников:

1. В.Н. Ивановский, С.С. Пекин, А.А. Сабиров. Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти. Москва 2003-245с.
2. П.Д. Ляпков. Подбор установки погружного центробежного насоса к скважине. Москва 1987-69с/
3. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. – Расчёт характеристик электроприводов переменного тока. Ч1.Асинхронный двигатель.: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ ,2005 – 136с.
4. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения машины по каталожным данным // Электричество, 1998, №4, с. 38 – 42.
5. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. - Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат, 1982 г., 392 стр.
6. Ланграф С. В. – реферат по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» на тему «Системы управления асинхронным электроприводом переменного тока».
7. Ланграф С.В. – Асинхронный электропривод, методическое пособие, Томск, 2003 г.
8. Шрейнер Р. Т., Дмитренко Ю. А. - Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинёв, «Штиинца», 1982 г., 328 стр.
9. Гарганеев А.Г., Каракулов А. С., Ланграф С. В., Нечаев М. А. Опыт разработки преобразователя частоты для асинхронного электропривода общепромышленного применения//Электротехника.2005№9.с.23-26
- 10.Герман-Галкин С.Г.«Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB », Учебное пособие.– Спб.: КОРОНА принт, 2001

- 11.Л.С. Удут, О.П. Мальцев, Н.В. Кояин. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие.-Томск: Изд-во ТПУ, 2010.-448с.
12. Ключев В. И. Теория электропривода: Учеб. Для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.: ил.
- 13.Булгаков А.А.– Частотное управление асинхронными электродвигателями.– М., «Наука», 1966 г., 298с.
- 14.Удут Л. С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование электроприводов. Часть 1. – Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. – Оптимизация контура регулирования: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 144 с.
- 15.Система погружной телеметрии для нефтяного оборудования. Режим доступа свободный: <http://isup.ru> , дата посещения 01.05.2017г.
- 16.. Добыча нефти и газа. Режим доступа свободный: <http://oilloot.ru> , дата посещения 05.01.2017г.

Приложение 1. Каталог ступеней и насосов ЗАО «Новомет – Пермь»

*ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСОВ

2ВННП5-30Г3

2ВННПК5-30Г3

2ВННПКН5-30Г3

BHH5-30-XXXXX/00-00X

BHH5-30-XXXXX/01-00X

ВНН5-30-XXXX/02-00X, для работы в средах с КВЧ до200мг/л

O ₂ , м ³ /сут	H, м	КПД, %	N, кВт	Длина секции, м / количество ступеней, шт.															
				3/107	4/146	4.5/165	5/184	6/223	3+4	4+4	4+5	5+5	5+6	6+6	4+4+5	4+5+5	5+5+5	5+5+6	
				Напор насоса, м															
0	6.2	0	0.032	660	900	1020	1135	1375	1560	1800	2035	2270	2510	2750	2935	3170	3405	3645	
10	5.9	22	0.030	625	855	965	1080	1305	1480	1710	1935	2155	2385	2610	2790	3010	3235	3460	
20	5.4	38	0.032	580	790	890	995	1205	1365	1580	1785	1990	2200	2410	2570	2780	2985	3195	
30	4.8	44	0.037	510	695	790	880	1065	1210	1395	1575	1760	1945	2130	2275	2455	2635	2825	
45	2.7	32	0.043	285	390	440	495	600	680	785	885	985	1090	1195	1275	1375	1480	1585	
50	1.7	22	0.045	185	255	285	320	385	440	505	570	635	705	770	825	890	955	1025	
Nном, кВт				3.9	5.4	6.1	6.8	8.2	9.3	10.7	12.1	13.5	14.9	16.4	17.5	18.9	20.3	21.7	
Nmax, кВт				5.1	7.0	7.9	8.8	10.7	10.5	12.4	13.8	15.6	17.0	18.9	22.9	24.7	26.5	28.4	
Напор насоса, м				500	700	800	900	1050	1200	1400	1600	1750	1950	2150	2250	2450	2650	2800	

*ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСОВ

2ВННПИС-30ГЗ

2ВННПМК5-30Г3

2ВННПІКН5-30Г3

BHH5-30-XXXXX/03-00X

BHH5-30-XXXXX/04-00X

ВНН5-30-XXXX/05-00X, для работы в средах с КВЧ до500мг/л

O, м³/сут	H, м	КПД, %	N, кВт	Длина секции, м / количество ступеней, шт.																
				3/9/16	4/12/4/8	4,5/14/0	5/15/7/10	6/19/0/12	3+4	4+4	4+5	5+5	5+6	6+6	4+4+5	4+5+5	5+5+5	5+5+6	5+6+6	6+6+6
Напор насоса, м																				
0	6,2	0	0,032	560	765	865	970	1175	1325	1530	1735	1940	2140	2345	2500	2705	2905	3110	3315	3520
10	5,9	22	0,030	535	725	820	920	1115	1260	1450	1645	1840	2030	2225	2370	2565	2760	2950	3145	3340
20	5,4	38	0,032	490	670	755	850	1025	1160	1340	1520	1695	1875	2055	2190	2365	2545	2725	2900	3080
30	4,8	44	0,037	435	590	670	750	910	1025	1185	1340	1500	1660	1815	1935	2090	2250	2410	2565	2725
45	2,7	32	0,043	245	330	375	420	510	575	665	755	840	930	1020	1085	1175	1260	1350	1440	1530
50	1,7	22	0,045	160	215	240	270	330	370	430	485	545	600	660	700	760	815	875	930	985
Nном, кВт				3,3	4,5	5,1	5,8	7,0	7,9	9,1	10,3	11,5	12,7	13,9	14,9	16,1	17,3	18,5	19,7	20,9
Nmax, кВт				4,4	6,0	6,7	7,5	9,1	8,9	10,5	11,7	13,3	14,5	16,1	19,4	21,0	22,6	24,2	25,8	27,4
Напор насоса, м				450	600	650	750	900	1050	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550	2700

^х -Характеристики могут уточняться.

Примечание: рамкой выделены насосы, в которых используется вал повышенной прочности, серым цветом – насосы с плавным пуском

Приложение 2. Технические характеристики электродвигателей ПЭДТН

Тип электродвигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	КПД, %	cos ϕ , %	Скорость вращения, %	Минимальный диаметр скважин мм	Скорость охлаждения жидкости не менее м/с	Количество секций	Установочная длина, мм	Масса, кг	Синхронная частота вращения, об/мин	Макс. темп. охлаждения жидкости, °С	Макс. темп. обмотки двигателя, °С
ПЭДТН 12-117	12	670	15	82,9	0,832	3,5	123,7	0,02	1	2205	125	3000	120	170
ПЭДТН 12-117	12	280	34	84,5	0,861	3,6	123,7	0,02	1	2205	125	3000	120	170
ПЭДТН 16-117	16	650	20	84,1	0,845	3,7	123,7	0,02	1	2585	155	3000	120	170
ПЭДТН 22-117	22	700	25,5	84,2	0,845	3,8	123,7	0,05	1	2965	185	3000	120	170
ПЭДТН 28-117	28	850	27	84,1	0,838	3,9	123,7	0,06	1	3345	215	3000	120	170
ПЭДТН 32-	32	1000	26,5	84,0	0,83	3,8	123,7	0,06	1	3725	245	3000	120	170

117														
ПЭД ТН 40- 117	40	1250	26,0	84, 4	0, 84 2	3,9	123, 7	0,07	1	448 5	305	3000	12 0	170
ПЭД ТН 45- 117	45	1400	26	84, 4	0, 84 6	3,8	123, 7	0,08	1	486 5	335	3000	12 0	170
ПЭД ТН 45- 117	45	1050	34	84, 0	0, 86 6	4,4	123, 7	0,08	1	486 5	335	3000	12 0	170
ПЭД ТН 50- 117	50	1050	38,5	84, 7	0, 84 3	4,0	123, 7	0,10	1	524 5	365	3000	12 0	170
ПЭД ТН 50- 117	50	1200	33	84, 3	0, 86 5	4,1	123, 7	0,10	1	524 5	365	3000	12 0	170
ПЭД ТН 56- 117	56	1300	34	84, 1	0, 87	4,3	123, 7	0,12	1	562 5	395	3000	12 0	170
ПЭД ТН 63- 117	63	1950	26	84, 4	0, 85	3,9	123, 7	0,12	1	638 5	455	3000	12 0	170
ПЭД ТН 63- 117	63	1350	38	84, 5	0, 83 9	3,9	123, 7	0,12	1	638 5	455	3000	12 0	170

ПЭД ТН 70- 117	70	2100	27	84, 3	0, 84 6	4,0	123, 7	0,30	1	676 5	485	3000	12 0	170
ПЭД ТН 80- 117	80	1800	36	84, 0	0, 84 9	4,3	123, 7	0,30	1	714 5	515	3000	12 0	170
ПЭД ТН 90- 117	90	1900	38	83, 6	0, 86 1	4,6	123, 7	0,30	1	752 5	545	3000	12 0	170
ПЭД ТН 100- 117	100	1800	45	84, 1	0, 84 8	4,6	123, 7	0,30	1	790 5	575	3000	12 0	170
ПЭД ТН 125- 117	125	2100	48,5	83, 7	0, 84 7	4,9	123, 7	0,30	1	904 5	665	3000	12 0	170
ПЭД ТНС 140- 117	140	1900	58	84, 7	0, 87 4	4,4	123, 7	0,30	2	123 61	918	3000	12 0	170
ПЭД ТНС 160- 117	160	2200	57	84, 7	0, 87	4,4	123, 7	0,30	2	142 61	105 9	3000	12 0	170
ПЭД ТНС 180- 117	180	2300	62	84, 1	0, 89 4	4,9	123, 7	0,30	2	150 21	111 5	3000	12 0	170
ПЭД	200	2600	61	84,	0,	4,6	123,	0,30	2	161	120	3000	12	170

ТНС 200- 117				4	86 3		7			61	0		0	
ПЭД ТНС 250- 117	250	2900	69	83, 6	0, 86 3	5,2	123, 7	0,30	2	176 81	131 2	3000	12 0	170
ПЭД ТНС 300- 117	300	2950	81,5	84, 0	0, 86 1	4,8	123, 7	0,30	3	225 17	167 1	3000	12 0	170

Приложение 3 Технические характеристики трансформаторов серии ТМПН

Тип трансформатора	Номинал. мощность, кВт·А	Схема и группа соединения обмоток	Кол-во ступеней регулирования	Номинальное напряжение Вн, В	Напряжение, В (ток, А) ступеней регулирования	Потери, Вт		Напря-жение к.э., %, не более	Размеры, мм					Масса, кг	
						х.х.	к.э.		Л	В	Н	А	А1	масла	полная
ТМШН-63/1-УХЛ1	63	У _н /У-0	10	611	675(53,9)-643(56,6)-611(59,5)-584(59,5)-549(59,5)-517(59,5)-483(59,5)-455(59,5)-423(59,5)-391(59,5)			5,5	1140	570	1370	500	480	153	500
			10	856	1023(35,6)-982(37)-941(38,7)-900(40,4)-856(42,5)-824(42,5)-781(42,5)-739(42,5)-698(42,5)-657(42,5)	200	1280								
			20	921	1143(31,8)-1106(32,9)-1069(34)-1032(35,3)-995(36,6)-958(38)-921(39,5)-884(39,5)-847(39,5)-810(39,5)-773(39,5)-736(39,5)-699(39,5)-662(39,5)-625(39,5)-588(39,5)-551(39,5)-514(39,5)-477(39,5)-440(39,5)										
ТМШН-63/3-УХЛ1			10	736	736(78,4)-708(78,4)-681(78,4)-649(78,4)-620(78,4)-592(78,4)-562(78,4)-530(78,4)-502(78,4)-475(78,4)										
			10	844	958(60,3)-920(62,8)-882(65,5)-844(68,4)-810(68,4)-782(68,4)-747(68,4)-709(68,4)-671(68,4)-633(68,4)										
			5	1170	1170(49,4)-1108(49,4)-1045(49,4)-983(49,4)-920(49,4)										
			25	1250	1690(34,2)-1646(35,1)-1602(36)-1558(37,1)-1514(38,1)-1470(39,3)-1426(40,5)-1382(41,8)-1338(43,2)-1294(44,6)-1250(46,2)-1206(46,2)-1162(46,2)-1118(46,2)-1074(46,2)-1030(46,2)-986(46,2)-942(46,2)-898(46,2)-854(46,2)-810(46,2)-766(46,2)-722(46,2)-678(46,2)-634(46,2)	290	1970	5,5	1200	800	1400	550	480	190	660
			5	1610	1610(35,9)-1525(35,9)-1440(35,9)-1355(35,9)-1270(35,9)										
			5	1980	2210(29,2)-2095(29,2)-1980(29,2)-1865(29,2)-1750(29,2)										
			36	1540	2500(28,9)-2440(29,6)-2380(30,3)-2320(31,1)-2260(31,9)-2200(32,8)-2140(33,7)-2080(34,7)-2020(35,7)-1960(36,8)-1900(38)-1840(39,2)-1780(40,5)-1720(42)-1660(43,5)-1600(45,1)-1540(46,9)-1480(46,9)-1420(46,9)-1360(46,9)-1300(46,9)-1240(46,9)-1180(46,9)-1120(46,9)-1060(46,9)-1000(46,9)-940(46,9)-880(46,9)-820(46,9)-760(46,9)-700(46,9)-640(46,9)-580(46,9)-520(46,9)-460(46,9)-400(46,9)	440	2100	5,5	1250	825	1550	550	550	245	820

Приложение 4. Потери напряжения на 1000м кабельной линии

Потери напряжения в кабеле с медными жилами сечением 3х16 мм., В (на 1000 метров)				Потери напряжения в кабеле с медными жилами сечением 3х21 мм., В (на 1000 метров)				Потери напряжения в кабеле с медными жилами сечением 3х25 мм., В (на 1000 метров)				Потери напряжения в кабеле с медными жилами сечением 3х33 мм., В (на 1000 метров)			
J ном пэд, А	Пластовая температура, °С			J ном пэд, А	Пластовая температура, °С			J ном пэд, А	Пластовая температура, °С			J ном пэд, А	Пластовая температура, °С		
	40-60	70-90	> 100		40-60	70-90	> 100		40-60	70-90	> 100		40-60	70-90	> 100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
4,6	28	32	35	14,6	21	24	27	14,6	18	20	23	14,6	13	16	17
18	34	39	44	18	26	30	33	18	22	25	28	18	17	19	21
21	40	46	51	21	31	35	39	21	26	29	33	21	19	22	25
22	42	48	53	22	32	37	41	22	27	31	34	22	20	23	26
24	46	53	58	24	35	40	45	24	29	34	37	24	22	26	28
25	48	55	61	25	37	42	46	25	31	35	39	25	23	27	29
26	50	57	63	26	38	43	48	26	32	36	40	26	24	28	31
27	51	59	66	27	39	45	50	27	33	38	42	27	25	29	32
28	53	61	68	28	41	47	52	28	34	39	44	28	26	30	33
29	55	64	70	29	42	48	54	29	35	41	45	29	27	31	34
30	57	66	73	30	44	50	56	30	37	42	47	30	28	32	35
32	61	70	78	32	47	53	59	32	39	45	50	32	29	34	38
33	63	72	80	33	48	55	61	33	40	46	51	33	30	35	39
34	65	74	83	34	50	57	63	34	42	47	53	34	31	36	40

35	67	77	85	35	51	58	65	35	43	49	54	35	32	37	41
36	69	79	87	36	53	60	67	36	44	50	56	36	33	38	42
37	70	81	90	37	54	62	69	37	45	52	58	37	34	39	43
38	72	83	92	38	55	63	71	38	46	53	59	38	35	40	45
39	74	85	95	39	57	65	72	39	48	54	61	39	36	41	46
40	76	88	97	40	58	67	74	40	49	56	62	40	37	43	47
41	78	90	100	41	60	68	76	41	50	57	64	41	38	44	48
42	80	92	102	42	61	70	78	42	51	59	65	42	39	45	49
43	82	94	104	43	63	72	80	43	53	60	67	43	40	46	51
44	84	96	107	44	64	73	82	44	54	61	68	44	41	47	52
47	90	103	114	47	69	78	87	47	57	66	73	47	43	50	55
48	91	105	117	48	70	80	89	48	59	67	75	48	44	51	56
49	93	107	119	49	72	82	91	49	60	68	76	49	45	52	58
51	97	112	124	51	74	85	95	51	62	71	79	51	47	54	60
53	101	116	129	53	77	88	98	53	65	74	82	53	49	56	62
55	105	120	134	55	80	92	102	55	67	77	86	55	51	58	65
56	107	123	136	56	82	93	104	56	68	78	87	56	52	60	66
57	109	125	138	57	83	95	106	57	70	80	89	57	52	61	67
58	110	127	141	58	85	97	108	58	71	81	90	58	53	62	68
59	112	129	143	59	86	98	110	59	72	82	92	59	54	63	69
60	114	131	146	60	88	100	111	60	73	84	93	60	55	64	70

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
62	118	136	151	62	91	103	115	62	76	87	96	62	57	66	73
63	120	138	153	63	92	105	117	63	77	88	98	63	58	67	74
64	122	140	155	64	93	107	119	64	78	89	100	64	59	68	75
65	124	142	158	65	95	108	121	65	79	91	101	65	60	69	76
67	128	147	163	67	98	112	124	67	82	94	104	67	62	71	79
69	131	151	168	69	101	115	128	69	84	96	107	69	64	73	81
72	137	158	175	72	105	120	134	72	88	101	112	72	66	77	85
73,5	140	161	179	73,5	107	123	137	73,5	90	103	114	73,5	68	78	86
77,5	148	170	188	77,5	113	129	144	77,5	95	108	121	77,5	71	82	91
78,5	150	172	191	78,5	115	131	146	78,5	96	110	122	78,5	72	83	92
81	154	177	197	81	118	135	150	81	99	113	126	81	75	86	95
82	156	180	199	82	120	137	152	82	100	115	128	82	75	87	96
86,5	165	189	210	86,5	126	144	161	86,5	106	121	135	86,5	80	92	102
88	168	193	214	88	129	147	163	88	108	123	137	88	81	94	103
90,5	172	198	220	90,5	132	151	168	90,5	111	126	141	90,5	83	96	106
98	187	215	238	98	143	163	182	98	120	137	152	98	90	104	115
99	189	217	240	99	145	165	184	99	121	138	155	99	91	105	116

61	116	134	148	61	89	102	113	61	75	85	95	61	56	65	72
----	-----	-----	-----	----	----	-----	-----	----	----	----	----	----	----	----	----

Приложение 5. Подбор СУ с частотным регулированием в зависимости от номинальной мощности ПЭД

Модель СУ с частотным регулированием «Электрон-05»	Полная выходная мощность СУ, кВА.	Номинальная мощность подключаемого двигателя общепромышленного исполнения, кВт	Номинальная мощность подключаемого ПЭД при 50 Гц, кВт.	Номинальная мощность подключаемого ПЭД при 70 Гц, кВт.
32	20	до 15	-	-
63	40	до 30	-	-
160	100	до 75	до 32	-
250	160	до 110	до 70	до 25
400	260	до 200	до 125	до 45
630	410	до 315	до 180	до 63
800	520	до 400	до 250	до 90
1000	650	до 500	до 320	до 110
1200	780	до 625	до 400	до 140
1800	1150	до 800	до 500	до 180